

**VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ –
TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA**

Hornicko-geologická fakulta

Institut environmentálního inženýrství

**Recyklace neshodných výrobků vznikajících při výrobě
magnetů**

**Recycling of non-conforming products produced during the
production of magnets**

Diplomová práce

Autor:

Bc. Alice Valderová

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Miluše Hlavatá, Ph.D

Ostrava 2017

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Hornicko-geologická fakulta
Institut environmentálního inženýrství

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Alice Valderová

Studijní program:

N2102 Nerostné suroviny

Studijní obor:

3904T022 Zpracování a zneškodňování odpadů

Téma:

Recyklace neshodných výrobků vznikajících při výrobě magnetů
Recycling of non-conforming products produced during the production
of magnets

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Specifikace výrobních procesů pro výrobu magnetů pro automobilový průmysl
3. Charakteristické vlastnosti odpadu
4. Návrh recyklace výrobního odpadu
5. Vyhodnocení
6. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

TORA, Barbara. Model procesu mletia. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1737-8.

Interní materiály technologie společnosti Feromagnet, s.r.o. Světlá Hora


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Miluše Hlavatá, Ph.D.**

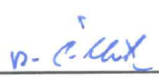
Konzultant diplomové práce: Ing. Alois Lakomý

Datum zadání: 31.10.2016

Datum odevzdání: 28.04.2017


doc. Ing. Silvie Heviánková, Ph.D.
vedoucí institutu




prof. Ing. Jaroslav Dvořáček, CSc.
pověřený vedením fakulty

Prohlášení

- Celou diplomovou práci včetně příloh, jsem vypracovala samostatně a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu. Byla jsem seznámena s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména § 35 – využití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a využití díla školního a § 60 – školní dílo.
- Beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně, ke své vnitřní potřebě, diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé diplomové práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB - TUO.
- Souhlasím s tím, že diplomová práce je licencována pod Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 Unported licencí. Pro zobrazení kopie této licence, je možno navštívit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>
- Bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu o komerční využití z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- Bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu komerčnímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

V Ostravě dne 25.4.2017

Podpis studenta*Valderová*.....

Poděkování

Ráda bych na tomto místě poděkovala především za možnost pracovat na tomto inspirativním tématu diplomové práce, za vedení a podporu paní Ing. Miluši Hlavaté, Ph.D. Panu Ing. Aloisovi Lakomému bych ráda poděkovala především za trpělivost při zasvěcování do problematiky, za konzultace, za podnětné rady a zapůjčené materiály. Velké poděkování věnuji také všem ostatním, bez jejichž trpělivosti by nemohla praktická část této práce vzniknout.

Anotace

Text představuje studii, která popisuje příklad z výroby permanentního magnetu ve fázi zpracování neshodných výrobků způsobem suchého mletí odpadu. První část diplomové práce je teoretická, seznamuje s problematikou magnetu a s aplikačními možnostmi permanentních magnetů. Specifikuje výrobní procesy permanentních magnetů a zmiňuje výrobu tvrdého feritového magnetu. Experimentální část popisuje vlastní práci na vibračním mlýně v praxi s odebráním vzorků, dále pak granulometrickou analýzu vzorků a jejich chování pod mikroskopem v Laboratoři sypkých hmot vědecko - technického pracoviště Centra ENET, Vysoké školy báňské – Technické univerzity a simulaci procesu mletí na laboratorním mlýně VŠB – TU Ostrava. Závěrečná část této práce se zabývá vyhodnocováním, vzájemným porovnáváním získaných výsledků a návrhem opatření.

Klíčová slova: magnet, neshodný výrobek, vibrační mlýn, granulometrická analýza, recyklace

Summary

Thesis is introducing the study, which is describing an example of manufacturing of permanent magnets using dry milling technology of nonconforming products. The first part of thesis is theoretical, it is introducing the theory of magnets and possibilities of application of magnets. It is specifying manufacturing processes of permanent magnets and mentioning the hard ferrite magnets. Experimental part is describing the milling on vibrating mill, taking the samples, granulometric analysis of samples and observing the behaviour of samples using a microscope in Laboratory of Bulk Materials, the workplace of ENET centre at VSB – TU Ostrava, and simulation of milling process on laboratory vibrating mill at VSB – TU Ostrava. The final part is about evaluating and comparing of the results and suggesting the action packages.

Key words: magnet, nonconforming product, vibrating mill, granulometric analysis, recycling

Obsah

1	ÚVOD A CÍL PRÁCE.....	1
2	SPECIFIKACE VÝROBNÍCH PROCESŮ PRO VÝROBU MAGNETŮ PRO AUTOMOBILOVÝ PRŮMYSL	2
2.1	Magnet.....	2
2.2	Charakteristické vlastnosti magnetických látek	4
2.2.1	Křivka prvotní magnetizace.....	4
2.2.2	Hysterezní křivka.....	5
2.3	Permanentní magnet	8
2.3.1	Feritové magnety	8
2.3.2	Magnety ze vzácných zemin.....	8
2.3.3	AlNiCo magnety.....	10
2.4	Souhrnný přehled o využití permanentních magnetů	10
2.5	Možnosti využití feritového magnetu v automobilovém průmyslu	11
2.6	Výrobní procesy permanentního magnetu pro automobilový průmysl.	12
2.6.1	Výrobní proces feritového magnetu	12
2.6.2	Výrobní proces magnetu ze vzácných zemin	13
2.6.3	Výrobní proces AlNiCo magnetu	15
2.7	Výrobní proces magneticky tvrdého feritového magnetu ve firmě Feromagnet	18
3	CHARAKTERISTICKÉ VLASTNOSTI ODPADU	19
3.1	Práce na vibračním mlýně ve firmě Feromagnet.....	19
3.2	Granulometrická analýza vzorků odebraných ve firmě Feromagnet	21
3.3	Simulace procesu mletí na vibračním mlýně v laboratoři VŠB – TU Ostrava	25
3.4	Granulometrická analýza vzorků odebraných při simulovaném procesu mletí	31

3.5	Mikroskopie všech odebraných vzorků.....	32
3.6	Rentgenová prášková difrakce	36
4	ANALÝZA A VYHODNOCENÍ.....	38
4.1	Práce na vibračním mlýně ve firmě Feromagnet.....	38
4.2	Granulometrická analýza vzorků odebraných ve firmě Feromagnet	38
4.3	Analýza a porovnání hodnot hmotnostního průtoku a granulometrické analýzy	39
4.4	Simulace procesu mletí na vibračním mlýně v laboratoři VŠB – TU Ostrava	40
4.5	Granulometrická analýza vzorků odebraných při simulovaném procesu mletí	40
4.6	Mikroskopie všech odebraných vzorků.....	41
4.7	Rentgenová prášková difrakce	41
5	NÁVRH RECYKLACE VÝROBNÍHO ODPADU.....	42
5.1	Návrh optimálního řešení stanoveného problému	42
5.2	Návrh implementace optimálního řešení do praxe.....	42
6	ZÁVĚR	44
	POUŽITÁ LITERATURA	46

1 ÚVOD A CÍL PRÁCE

Magnet je těleso, které kolem sebe vytváří magnetické pole. Magnetické pole umožňuje magnetu mít jeho specifickou schopnost přitahovat magnetické materiály. Magnet může mít formu elektromagnetu nebo permanentního magnetu. Elektromagnety potřebují k vytvoření magnetického pole elektrický proud. Permanentní magnety nepotřebují k vytváření magnetického pole vnější vlivy, jsou schopny trvale okolo sebe vytvářet magnetické pole. Rozlišujeme feritové magnety, magnety ze vzácných zemin a AlNiCo magnety.

Magnety mají mnoho způsobů využití v různých oborech, jsou stále více v naší civilizaci vyhledávány, výrobky z nich mají strategický význam a jejich celosvětová spotřeba stále stoupá. Permanentní magnety nacházejí využití zejména v automobilovém průmyslu, elektrotechnickém a energetickém průmyslu, zdravotních přístrojích a dalších.

V souvislosti s ochranou životního prostředí je důležité řešit otázku jejich recyklace, která povede k dalšímu využití odpadu jako druhotné suroviny ve výrobním procesu. Recyklace, jako proces, kterým se snažíme z odpadního materiálu vytvořit opět materiál přibližně stejné kvality, je v souvislosti s potřebou snižování ekologické zátěže aktuálním tématem naší doby.

Důležitým impulzem při výběru tématu „Recyklace neshodných výrobků vznikajících při výrobě magnetu“ byla vize možnosti ovlivnit smysluplnost řízené recyklace vznikajícího odpadu při výrobě magnetu v praxi.

Cílem této diplomové práce je prověřit některé podmínky zpracování feritového magnetu ve fázi suchého mletí.

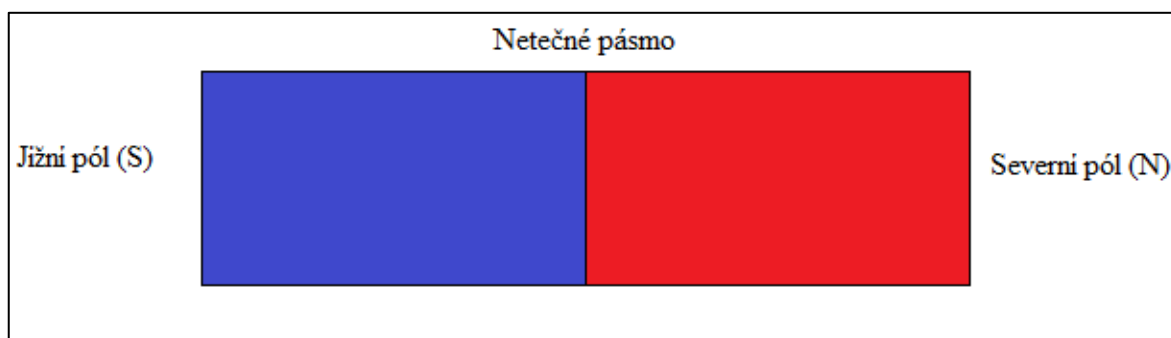
2 SPECIFIKACE VÝROBNÍCH PROCESŮ PRO VÝROBU MAGNETŮ PRO AUTOMOBILOVÝ PRŮMYSL

2.1 Magnet

Magnet je těleso, které kolem sebe vytváří magnetické pole. Magnetické pole umožňuje magnetu mít jeho specifickou schopnost přitahovat magnetické materiály. Magnet může mít formu permanentního magnetu nebo elektromagnetu.

Permanentní magnety nepotřebují k vytváření magnetického pole vnější vlivy. Vyskytují se přirozeně v některých horninách, mohou se také vyrobit. Elektromagnety potřebují k vytvoření magnetického pole elektrický proud. [27]

Magnetické síly jsou nejvýraznější na koncích magnetu, pólech, přičemž každý magnet má jeden severní a jeden jižní pól. Mezi nimi je netečné pásmo, ve kterém magnetické síly nepůsobí viz obr. 1.



Obr. 1: Tyčový magnet

Tělesa, která jsou přitahována magnetem, jsou tvořena látkami, které mají feromagnetické vlastnosti. Feromagnetické vlastnosti má např. železo, kobalt, nikl. Tělesa z feromagnetických látek se v blízkosti magnetu stávají magnety. [28]

Experimentálně bylo ověřeno, že magnetické pole určité intenzity vyvolá v různých prostředích odlišné účinky. Základní fyzikální veličiny popisující magnetické pole jsou: [1]

- **Magnetický tok (Φ)** – vektorová fyzikální veličina charakterizující počet indukčních siločar magnetického pole procházejících danou plochou, která je kolmá na směr orientace siločar.

- **Intenzita magnetického pole (H)** - vektorová fyzikální veličina, která popisuje míru silových účinků magnetického pole v závislosti na faktorech, které pole vytvářejí a nezávisle na parametrech prostředí, ve kterém je magnetické pole vytvářeno.
- **Magnetická indukce (B)** - vektorová fyzikální veličina, která vyjadřuje počet indukčních siločar magnetického pole procházejících plochou o velikosti 1m^2 .
- **Permeabilita neboli propustnost (μ)** - skalární fyzikální veličina vyjadřující magnetickou polarizovatelnost (prostupnost pro magnetické pole) prostředí, ve kterém je magnetické pole vytvářeno.
- **Permeabilita neboli prostupnost vakua (μ_0)** čili magnetická indukční konstanta vakua – je skalární fyzikální veličina, která popisuje magnetickou polarizovatelnost vakua.
- **Relativní (poměrná) permeabilita neboli prostupnost prostředí (μ_r)** je skalární fyzikální veličina, která popisuje relativní magnetickou polarizovatelnost prostředí, ve kterém je magnetické pole vytvářeno.

Rozdílné magnetické vlastnosti prostředí vyjadřuje zejména relativní (poměrná) permeabilita prostředí, podle jejíž hodnoty se rozlišují materiály: [1]

- **Diamagnetické ($\mu_r < 1$)**. Mezi diamagnetické látky jsou řazeny inertní plyny, bromid draselný, voda ($\mu_r = 0,999\ 991$), kuchyňská sůl ($\mu_r = 0,999\ 9984$), měď ($\mu_r = 0,999\ 990$), bizmut ($\mu_r = 0,999\ 848$), rtuť, zinek, olovo, stříbro, zlato, některé plasty, organické látky, supravodiče a další látky.
- **Paramagnetické ($\mu_r > 1$)**. Do skupiny paramagnetických látek patří např. plynný kyslík ($\mu_r = 1,000\ 001\ 86$), kapalný kyslík ($\mu_r = 1,003\ 620$), hliník ($\mu_r = 1,000\ 023$), platina ($\mu_r = 1,000\ 264$), paládium, vanad, chrom, titan, ebonit, hořčík, sodík, draslík, vzduch, různé přechodné kovy, kovy vzácných zemin, aktinidy a jiné látky.
- **Feromagnetické ($\mu_r \gg 1$)**. Pokud se při ohřívání překročí určitá hodnota teploty (tzv. Curieova teplota, např. pro železo 770°C), změní se feromagnetická látka v paramagnetickou a pokud je zmagnetována, dojde k jejímu odmagnetování. Mezi feromagnetické látky je řazeno železo, kobalt, nikl, gadolinium a jejich slitiny.

Zvláštními druhy feromagnetických materiálů jsou: [1]

- a) *antiferomagnetické materiály* - příkladem těchto látek je např. chrom a mangan.
- b) *ferimagnetické materiály* – příkladem těchto látek jsou zejména ferity, vyráběné práškovou technologií z oxidu železa Fe_2O_3 a sloučenin jiných kovů případně vzácných zemin (mangan, neodym, bariem, stroncium, atd.). Kromě velké hodnoty poměrné permeability mají mnohem větší měrný elektrický odpor než feromagnetické látky a používají se proto např. pro výrobu jader cívek vysokofrekvenčních obvodů.

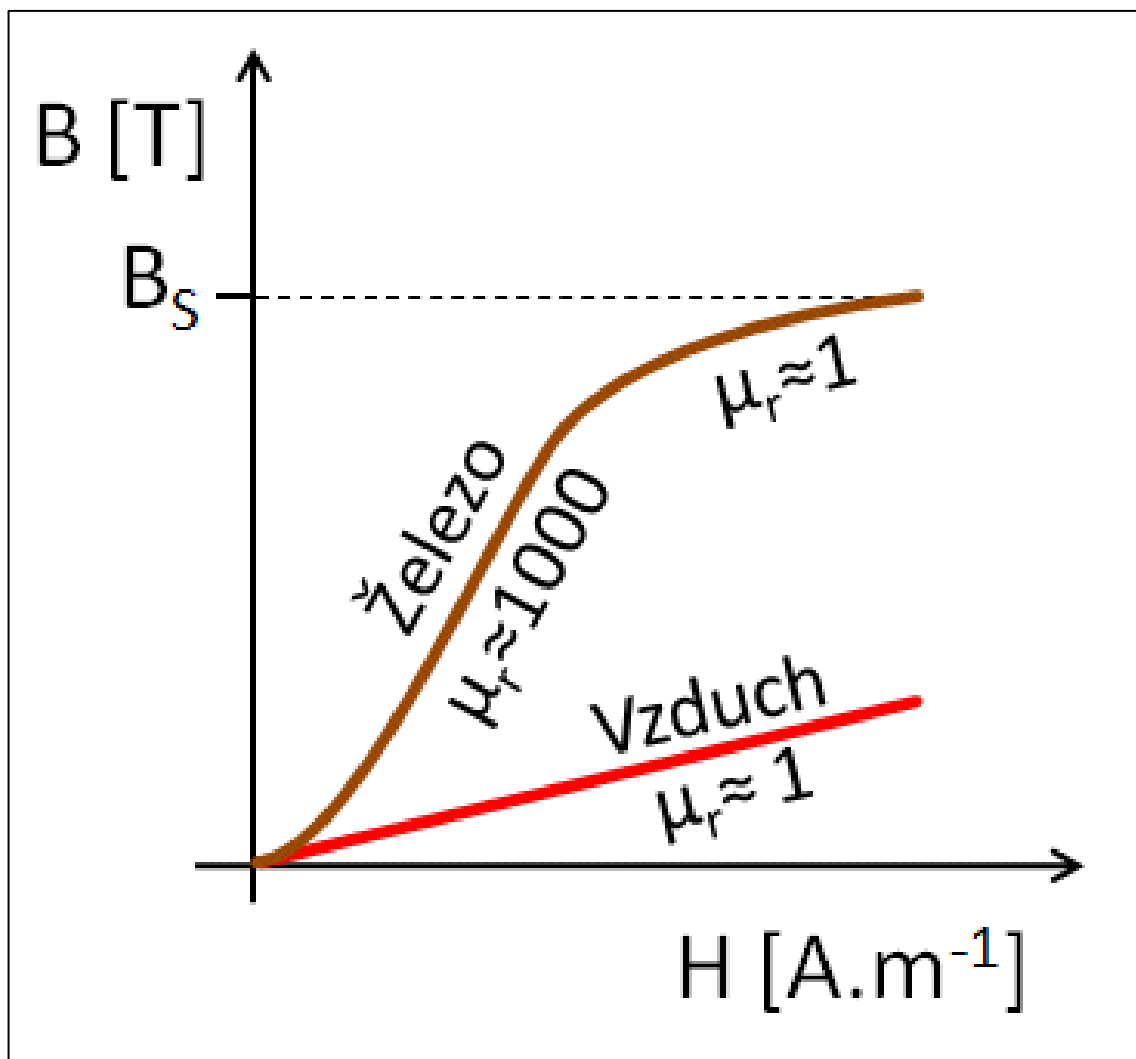
2.2 Charakteristické vlastnosti magnetických látek

Při popisu magnetických vlastností, především feromagnetických látek, se sleduje jejich závislost na působení vnějšího magnetického pole, které je popsáno velikostí magnetické intenzity a velikostí magnetické indukce. Pro hodnocení charakteristických vlastností magnetických materiálů jsou uplatňovány grafické metody, jako je křivka prvotní magnetizace a hysterezní křivka.

2.2.1 Křivka prvotní magnetizace

Křivka prvotní magnetizace, nazývaná také magnetizační křivkou, je popsána jako závislost velikosti magnetické indukce (B) na velikosti intenzity magnetického pole (H) u feromagnetického materiálu, který ještě nepodléhá působení vnějšího magnetického pole. Průběh této funkční závislosti $B = f(H)$ je pro diamagnetický a paramagnetický materiál lineární. Kdežto u feromagnetických látek je tato závislost nelineární. [2][3][15][16]

Na obr. 2 je znázorněn rozdíl mezi chováním feromagnetické látky (železa) a paramagnetické látky (vzduchu). Feromagnetická látka při nízké intenzitě vykazuje chování paramagnetické látky. Magnetická intenzita mírně vzrůstá a dochází k zesílení vnějšího magnetického pole. Hodnota magnetické intenzity vzrůstá až do bodu B_s , jež značí magnetické nasycení, kdy se všechny domény feromagnetické látky rozmístí stejným směrem jako je směr vnějšího magnetického pole. Materiál se poté opět chová jako paramagnetický a hodnota magnetického pole nestoupá. Z toho vyplývá, že permeabilita feromagnetických materiálů je závislá na intenzitě vnějšího magnetického pole.

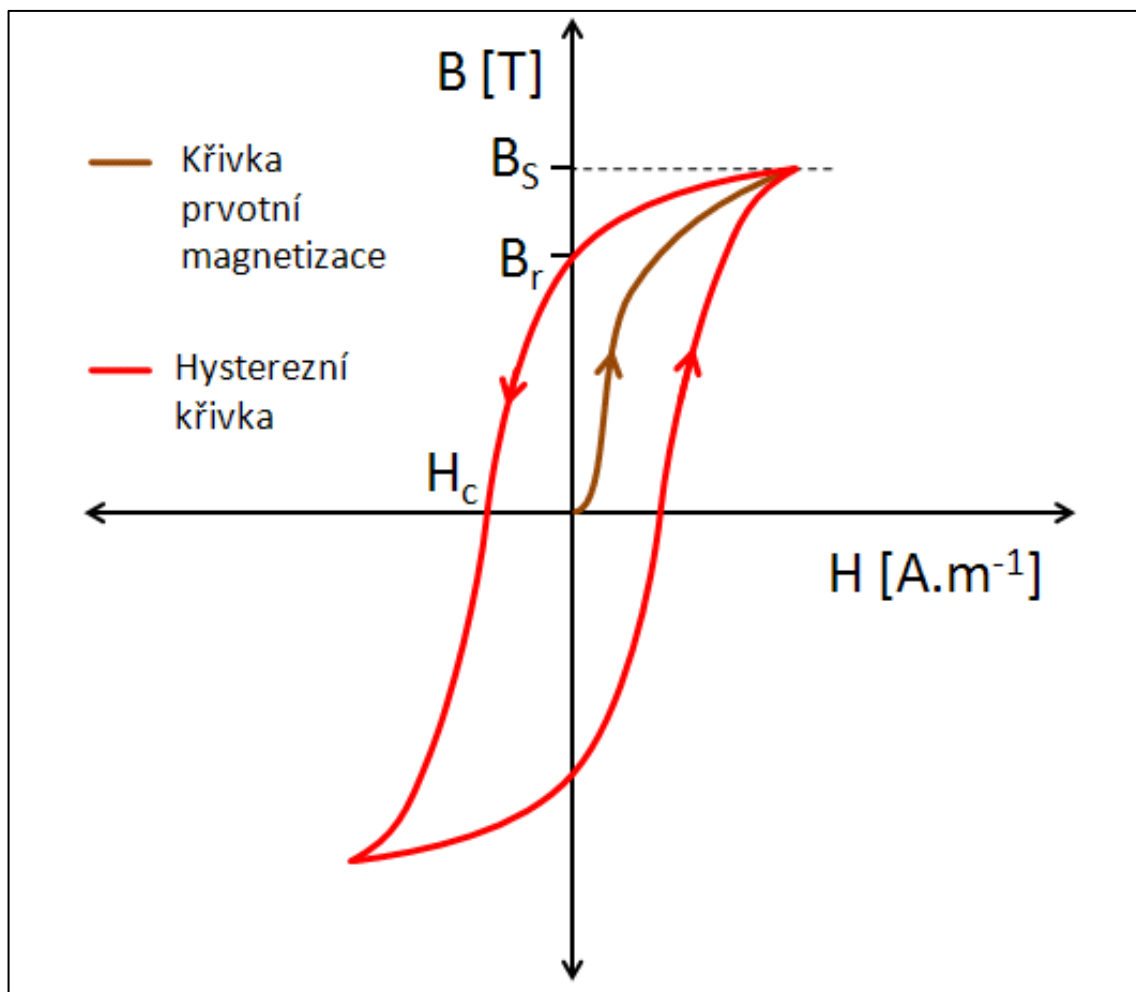


Obr. 2: Magnetizační křivka feromagnetické a paramagnetické látky [15]

2.2.2 Hysterezní křivka

Po dosažení stavu magnetického nasycení pomocí vnějšího magnetického pole se začne snižovat hodnota intenzity i hodnota magnetické indukce. Pokles hodnoty magnetické indukce probíhá na úplně jiné křivce, kterou označujeme jako hysterezní křivku. [3]

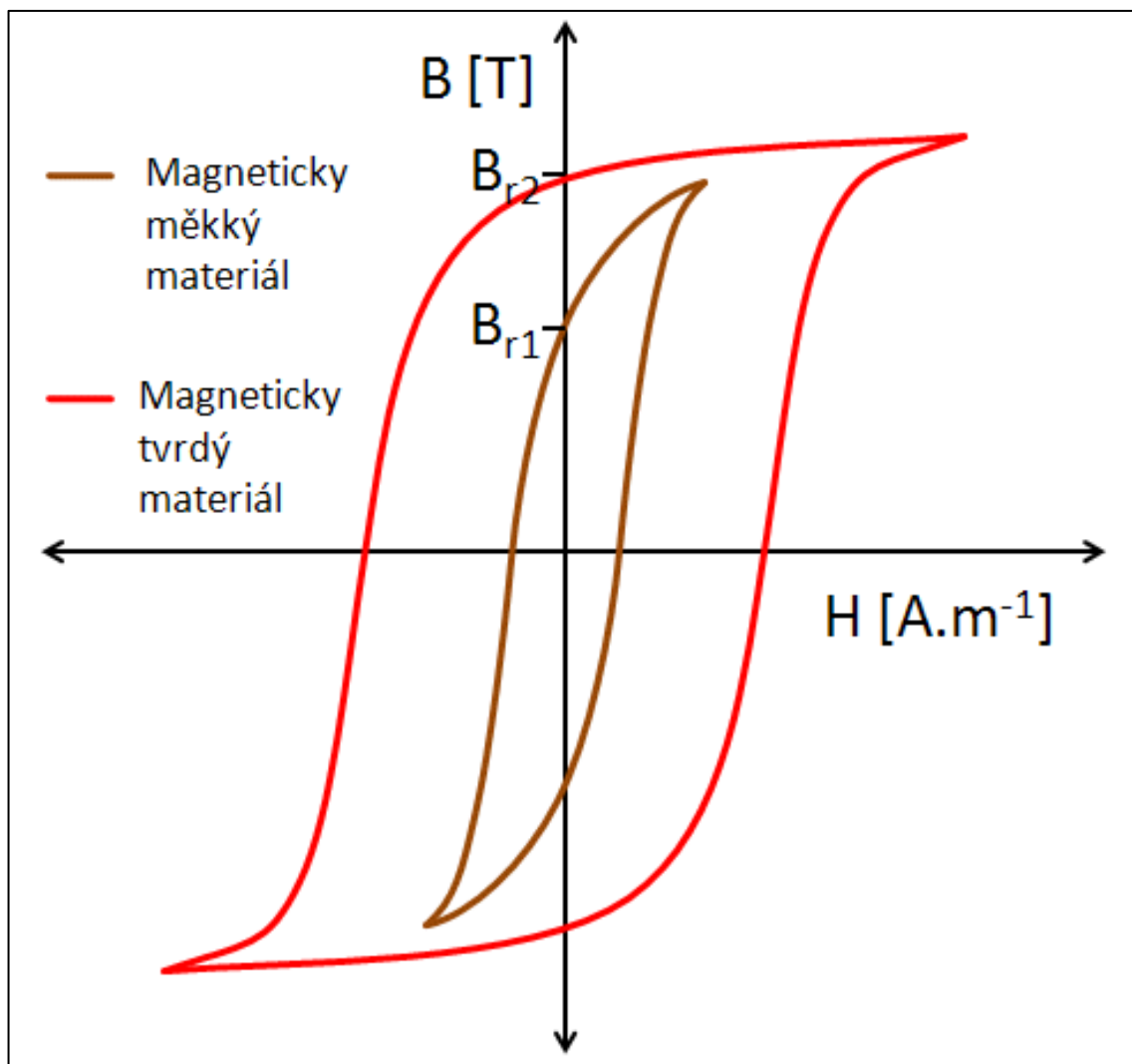
Hysterezní křivka je vyjádřena jako závislost hodnoty magnetické indukce na proměnlivé hodnotě intenzity magnetického pole při opakované a protisměrné magnetizaci feromagnetického materiálu. Na obr. 3 je znázorněna funkční závislosti $B = f(H)$. Hodnota intenzity vnějšího pole klesá, domény se natáčí jiným směrem a materiál je zbytkově magnetický B_r . Pro odstranění zbytkového magnetismu je potřeba intenzity H_C . [1][15]



Obr. 3: Hysterezní křivka feromagnetického materiálu [15]

Tvar hysterezní křivky ovlivňuje krystalickou mřížku, chemické složení a způsob zpracování magnetického materiálu. Proto lze magnetický materiál podle hysterezní křivky rozdělit na magneticky tvrdé a měkké materiály, obr. 4: [2][1]

- a) *Měkké feromagnetické látky* – materiály s úzkou hysterezní křivkou a vysokou permeabilitou. Mimo magnetické pole své magnetické vlastnosti ztrácejí. Řadíme zde velmi měkké oceli, slitiny železa a niklu, slitiny železa, niklu a kobaltu. [1][2][32]
- b) *Tvrde feromagnetické látky* – materiály s širokou hysterezní křivkou a nízkou permeabilitou. Mimo magnetického pole zůstávají trvale zmagnetovány. Používají se na výrobu permanentních magnetů. [1][2][32]



Obr. 4: Ukázka magneticky tvrdého a měkkého materiálu [15]

Magnetické vlastnosti feromagnetických látek definuje magnetizační křivka s hysterezní smyčkou, tj. znázornění závislosti hodnoty magnetické indukce (B) na hodnotě intenzity magnetického pole (H): $B = f(H)$.

Pro porovnání vlastností magneticky tvrdých materiálů je postačující druhý kvadrant hysterezní smyčky (tato je často označována jako demagnetizační křivka). Magnetické vlastnosti trvalého magnetu lze stanovit z demagnetizační křivky feromagnetického materiálu, ze kterého jsou vyrobeny. [1]

Existují dva typy magnetů, permanentní magnet a elektromagnet. Tato práce je zaměřena na problematiku recyklace permanentních magnetů.

2.3 Permanentní magnet

Permanentní magnet je objekt, který může být vyrobený z magneticky tvrdého materiálu, ale vyskytuje se i v některých horninách. Je schopen trvale okolo sebe vytvářet magnetické pole bez vnějšího působení. [3]

Rozlišujeme feritové magnety, magnety ze vzácných zemin a AlNiCo magnety.

2.3.1 Feritové magnety

Feritové magnety, též známé jako keramické magnety, patří mezi nejpoužívanější a cenově nejdostupnější materiály pro výrobu magnetu. Jejich celosvětová spotřeba stále roste a nyní dosahuje okolo 300 000 tun ročně. [6]

Tyto materiály jsou vyráběny z oxidu železa a barya nebo uhličitanu strontnatého. Nejčastěji se jedná o sloučeniny $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ a $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$. Z 86 % jsou složeny z Fe_2O_3 a ze 14 % BaO_2 nebo SrO . Suroviny pro jejich výrobu jsou dobře dostupné a cenově výhodné. [1]

Předními vlastnostmi feritových magnetů jsou křehkost, tvrdost a odolnost vůči korozi. Z důvodu jejich velmi vysoké křehkosti vyžadují broušení za použití diamantového kotouče.[5] Jsou vysoce účinné a není snadné je demagnetizovat (demagnetizace je proces, při kterém se snižuje celková magnetická polarizace v magnetu, nazývá se také odmagnetování). Dále jsou velmi dobře odolné vůči chemikáliím, jako jsou ředidla, slabé zásady a kyseliny. Odolnost vůči silným organickým a anorganickým kyselinám je ovlivněna teplotou, koncentrací a délkou působení. Jsou to nejméně silné permanentní magnety. [1][10]

Feritové magnety mají široký rozsah použití. Uplatnění nacházejí v automobilovém průmyslu jako součást magnetických spojek a brzd, dále se aplikují jako přídržné magnety v průmyslu, kanceláři či v domácnostech, jsou užitečné při výrobě hraček, výrobě senzorů pro určování polohy, jako spínače apod. [6]

2.3.2 Magnety ze vzácných zemin

Magnety ze vzácných zemin se vyrábějí ze skupiny prvků, které jsou v periodické tabulce označeny jako kovy alkalických zemin. Nejrozšířenějšími prvky na výrobu permanentních magnetů jsou samarium (Sm) a neodym (Nd). Používají se také prvky,

kteřé jsou v periodické tabulce označeny jako přechodné kovy. Nejčastěji užívanými prvky jsou kobalt (Co) a železo (Fe). Kovy alkalických zemin s přechodnými kovy vytvářejí tzv. intermetalické sloučeniny. Intermetalická sloučenina je sloučenina rozdílných kovů. Při výrobě permanentního magnetu se využívají tři typy těchto sloučenin – SmCo_5 , $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ a $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ a vyrábějí se z nich dva typy magnetů – samarium kobaltové a neodymové. [1][3]

Ve srovnání s ostatními permanentními magnety mají tyto materiály silnější magnetické pole a lesk typický pro kovové materiály. Vykazují podobné vlastnosti jako kovy. Kvůli jejich tvrdosti se obrábějí diamantovými nástroji. V kyselém prostředí se rozpouštějí, zásaditému odolávají, jsou náchylné vůči korozi. [1]

Samarium kobaltové magnety

Samarium kobaltové magnety, značené SmCo magnety, jsou vyrobeny ze samaria a kobaltu. V současnosti se vyskytují ve dvou formách - SmCo_5 a $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$. [1]

Jsou několásobně silnější než ostatní druhy permanentních magnetů. SmCo magnety jsou křehké a náchylné k lámání a praskání. Z hlediska magnetických vlastností vykazují lepší teplotní stabilitu, větší rozsah pracovních teplot (do 300 °C) a výrazně větší odolnost vůči korozi. [1][3][5]

Samarium kobaltové magnety se používají tam, kde je vysoká teplota a odolnost proti korozi. Typickými oblastmi použití jsou motory, generátory, malé reproduktory, kontrolní přístroje, senzory a satelitní systémy. [3]

Neodymové magnety

Neodymové magnety se skládají ze směsi neodymia, železa a bóru. Vyskytují se ve formě intermetalické sloučeniny $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$. Kombinací železa a bóru tvoří nejsilnější magnet na světě. [9]

Neodymové magnety vynikají vysokou tvrdostí a vysokou mechanickou odolností. Disponují podobnými vlastnostmi jako samarium kobaltové magnety, ale jsou náchylnější ke korozi a nemají tak dobrou teplotní stabilitu. Rychlost koroze významně vyšší než u železa. Za sucha jsou relativně stabilním, avšak za vlhka dochází ke korozi a

ztratě magnetických vlastností. Proto je nutné je ošetřit ochrannou vrstvou proti korozi. [1][2][3][9]

Typickými oblastmi použití jsou hlavně jako součásti dieslových motorů, separátorů, reproduktorů, mikrofونů a počítačů [3].

2.3.3 AlNiCo magnety

Magnety AlNiCo jsou materiály vyrobené ze směsi hliníku, niklu, kobaltu, železa, mědi a titanu [1].

Vynikající teplotní stabilita, vysoká tvrdost, křehkost a odolnost vůči korozi jsou charakteristickými vlastnostmi těchto materiálů [8]. Je možné je používat při teplotách až 525 °C (u neodymových magnetu je to maximálně 200 °C). Další jejich velkou výhodou je vysoká odolnost vůči kyselinám a rozpouštědlům. Vzhledem k jejich křehkosti nejsou ideálním materiálem pro výrobu konstrukčních prvků.[7] Nevýhodou je jejich snadná možnost demagnetizace.

Používají se ve výrobě elektromotorů střední velikosti, generátorů, reproduktorů, elektrických měřicích přístrojů a přídržných průmyslových systémech [6].

Z výše uvedeného vyplývá, že nejsilnějším magnetem je neodymový a tepelně nejodolnějším je AlNiCo magnet.

2.4 Souhrnný přehled o využití permanentních magnetů

Permanentní magnety, trvalé, jsou využívány v různých oborech. Níže uvedený přehled uvádí jen několik příkladů: [1][11]

- motory - pro spouštěče, rozdělovače, zapalování,
- výpočetní technika – klávesnicové magnety, pevné disky,
- elektrotechnika - magnety do rotorů, magnety do čidel, hallový sondy, relé,
- energetika – dynamo, jističe, generátory, větrné elektrárny,
- jemná mechanika – bezdotyková ložiska, spojky, hodiny,
- transportní technika – výtahy, dopravníky, čerpadla,

- přístroje v domácnosti – mikrovlnné trouby, myčky, pračky,
- medicína – tomograf, veterinární magnety, extenzní magnety, rovnání zubů,
- automobilová technika – ABS, airbagy, spouštěče, kapalinové stavoznaky, senzory klikových a váčkových hřídelí, regulace hladin, polohování řadicí páky, polohování volantu, regulace světlometů, stěrače, stahování oken, tachogenerátory,
- magnetické systémy – upínací a přídržné systémy, separační systémy, uzavírací systémy, filtry, bezdotyková míchadla,
- strojírenství – brzdy, čelní a radiální bezdotykové spojky, tiskařské válce, filtrační systémy, roboty, textilní stroje,
- telekomunikace – rozhlasové a televizní stroje, mikrofony, sluchátka, video, telefonní zařízení, reproduktory,
- měřicí zařízení – elektronické váhy, magnetické ventily, elektroměry, plynoměry, vodoměry,
- letectví, astronautika a lodní doprava – kompas, navigační přístroje, pohony,
- senzory – impulzové senzory,
- ekologie – čištění odpadních vod, úprava vody, separační systémy. [1][11]

2.5 Možnosti využití feritového magnetu v automobilovém průmyslu

U feritových magnetů, jako nejrozšířenější skupiny magnetů, jejichž výhodou je levnější kilogramová cena, je jednou z nejvýznamnějších oblastí použití automobilový průmysl.

Některé příklady aplikace s využitím feritového magnetu v automobilovém průmyslu uvádí následující přehled: [29][30][31]

- dmychadla,
- stěrače,

- stahování oken,
- separátory,
- klimatizační zařízení,
- reproduktory,
- startéry,
- brzdy,
- ABS systém,
- senzory. [29][30][31]

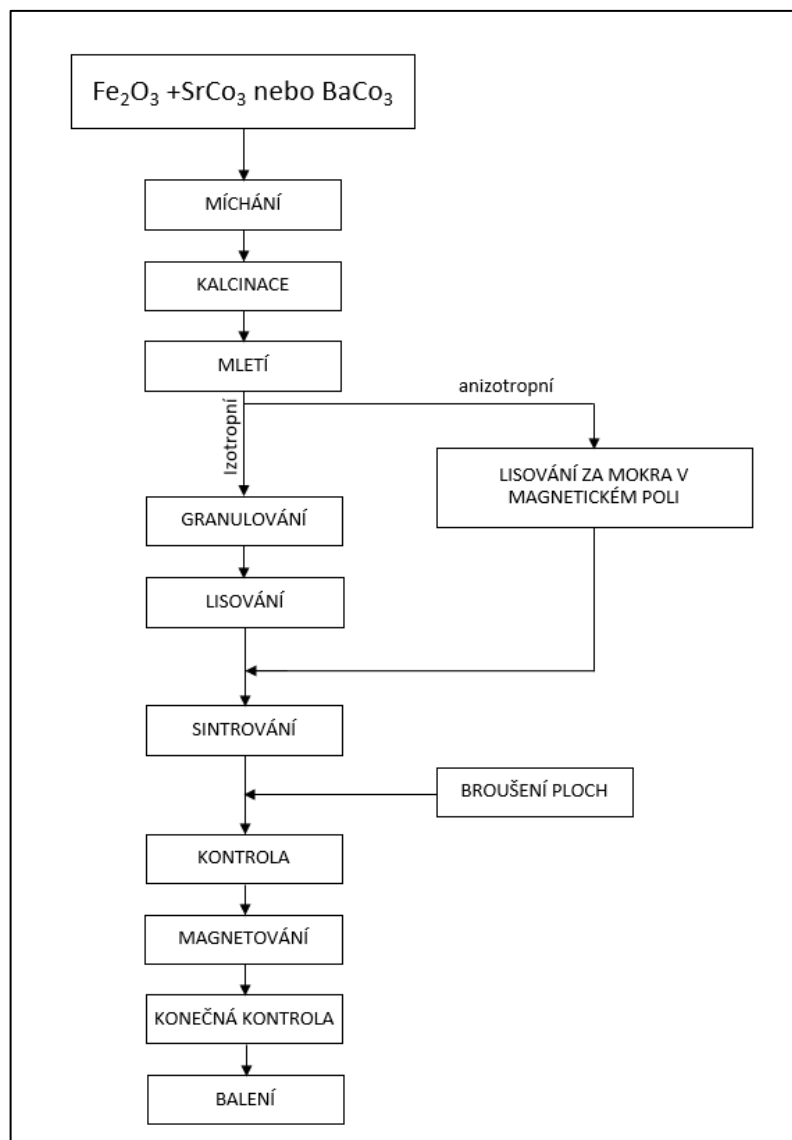
2.6 Výrobní procesy permanentního magnetu pro automobilový průmysl

Každý druh permanentního magnetu má svůj specifický proces výroby. Společnou výrobní technologií pro všechny typy magnetu je prášková metalurgie, metoda, při které se směs prášků kovů mísí, poté lisuje do formy a následně spéká za vysoké teploty. Vzniklý produkt je velmi tvrdý a nelze jej zpětně opravit či opracovat do požadované podoby. Proto je nutné již při výrobě důsledně definovat výsledné rozměry a také je přesně vyrobit. V konečné fázi je možné jemně obrousit a dosáhnout tak striktně rovinných ploch. [12]

2.6.1 Výrobní proces feritového magnetu

Feritový magnet se vyrábí z oxidu železitého (Fe_2O_3) a uhličitanů barya a stroncia (BaCO_3 a SrCO_3). Tyto suroviny se mísí v poměru 80% Fe_2O_3 a 20% BaCO_3 nebo SrCO_3 . Tato směs se podrobuje kalcinaci za vzniku hexaferitu. Kalcinace je vysokoteplotní proces, při kterém se jeden tuhý materiál vyloučí jako plynná látka a druhý vytvoří tuhou látku. Poté probíhá lisování do požadovaných tvarů za sucha nebo ve formě vodné suspenze. Za sucha se lisují magnety izotropní neboli magnety se stejnými magnetickými vlastnostmi ve všech směrech. Ve vodné suspenzi se lisují anizotropní magnety, tj. magnety s rozdílnými vlastnostmi v různých směrech. Konečný tvar, velikost a houževnatost magnety získávají vypálením (sintrováním) při teplotě 1200 °C. Následně jsou magnetovány a po výstupní kontrole baleny a expedovány.

Následující obr. 5 znázorňuje sled nejdůležitějších operací při výrobě feritového magnetu. [1]



Obr. 5: Schéma výroby feritového magnetu

2.6.2 Výrobní proces magnetu ze vzácných zemin

Práškovou metalurgií je část vstupní suroviny (oxidy vzácných zemin a kovy) zpracována na mikrokrytalický prášek. Druhá část vstupní suroviny (pouze kovy) je tavena ve vakuových pecích pomocí elektromagnetické indukce. Ze vzniklého prášku a taveniny je vyrobena slitina o požadovaném složení. [2]

Slitina je následně odlévána na měděné vodou chlazené rotující kolo za vzniku tenkých mikrokrytalických pásků o tloušťce do 500 μm a velikosti zrn od 5 do 60 μm [2].

Tenké pásky jsou drceny pomocí fyzikálního drcení zvaného vodíková dekrepitace [2].

Po druhém drcení následuje rozmělnění na jemnější částice pomocí tryskového mlýnu, který se skládá z mlecí komory opatřené po celém svém obvodu soustavou trysek. Do komory je vháněn stlačený dusík. Dusík drcenému materiálu předává rychlost, částice do sebe narážejí a rozmělnují se. Proudem plynu unášené rozemleté částice putují do třídícího kola, kde se oddělí frakce o potřebné velikosti. [2]

Jemná frakce je poté umístěna do pryžové formy a usměrněna za působení vnějšího magnetického pole. Po usměrnění je izostaticky, neboli ze všech stran stejnoměrně, lisována. Může být lisována i axiálně, tj. ve směru osy. [2][13]

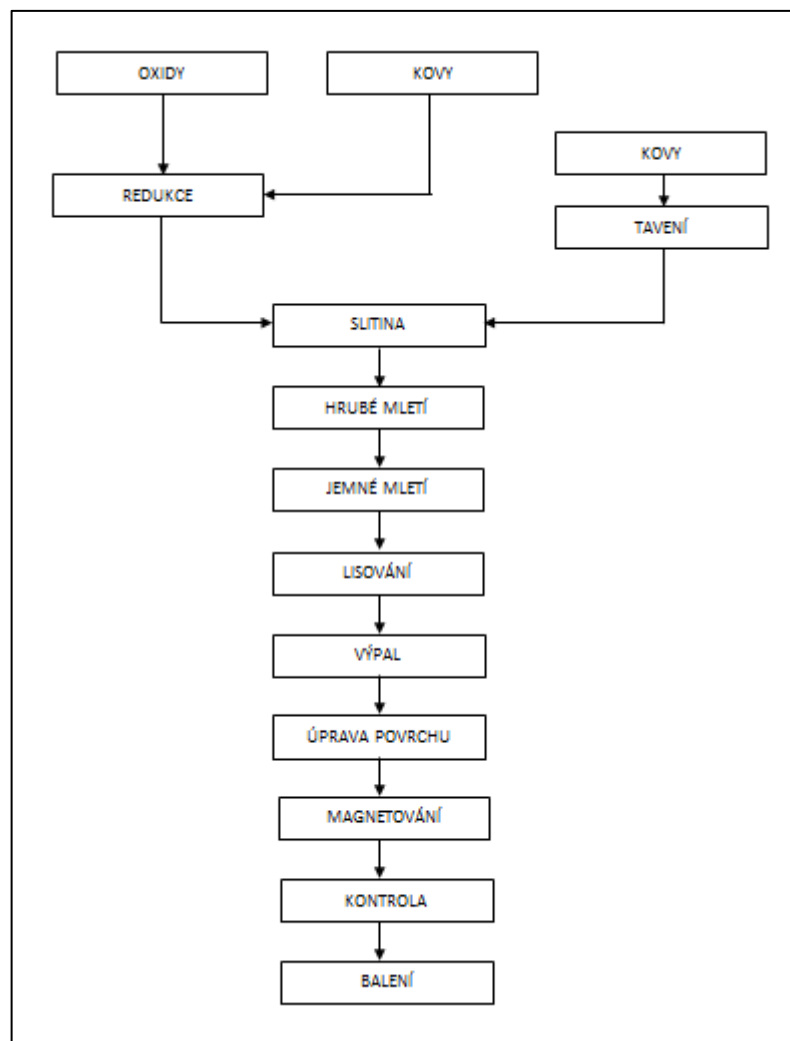
Výlisky jsou pak slinovány, neboli vypáleny. Jedná se o hlavní proces zpevnění permanentního magnetu vzácných zemin. Je prováděn v peci s argonem při teplotě okolo 1000 °C nebo ve vakuu 10^{-3} po dobu až čtyř hodin. Proces spékání magnetů ze vzácných zemin je doprovázen vznikem kapalně fáze, která smáčí povrch magnetu. Na smáčivosti pevné fáze závisí kvalita vzniklého výrobku, je nutný ostrý úhel smáčivosti. Činiteli ovlivňující proces spékání mohou být rovnoměrná hustota zaplnění, teplota a čas spékání, velikost zrn, tvar částic, obsah kyslíku a další. Díky slinování získává materiál potřebné mechanické a fyzikální vlastnosti. [2]

Broušením či ořezem se může vzniklý produkt dopravit do potřebných parametrů. Upravuje se na úzké tolerance, ve zvláštních případech je nutné opracování po všech stranách s dodržáním rozměrové a hmotnostní tolerance. Toto opracování se s ohledem na tvrdost a křehkost materiálu provádí s velkou pečlivostí. [1][2]

Povrchová úprava slinovaného magnetu dodá výrobku odolnost vůči korozi. Jediným řešením je nanesení povrchové vrstvy. Ochranná vrstva je tenká, hladká, bez pórů a trhlin, tepelně stabilní látka nepropustná pro plyny a vlhkost. Praktickými příklady povrchové úpravy mohou být vystavení magnetu atmosféře dusíku, oxidu uhličitého či ponoření do acidické lázně. [2]

Na konci výrobního procesu jsou magnety podrobeny kontrole, po které konečný produkt zabalen a expedován. Na každém obalu musí být uvedeny údaje pro přejímku a případnou reklamaci dodávky [1].

Na obr. 6 je zobrazen výrobní proces magnetu ze vzácných zemin.



Obr. 6: Schéma výroby magnetů ze vzácných zemin

2.6.3 Výrobní proces AlNiCo magnetu

AlNiCo magnety se vyrábějí dvěma způsoby, sléváním a spékáním. Magnety vyrobené metodou slévání mají vyšší hustotu a hmotnost, což jim dodává lepší magnetické vlastnosti a výkon. Výroba magnetů metodou spékání je ekonomicky výhodnější. Slévání se využívá pro výrobu magnetů o velké hmotnosti a spékání pro výrobu magnetů o hmotnosti několika gramů. [14]

Metoda slévání:

Vstupní suroviny jsou smíchány a vloženy do indukční pece s teplotou 1750 °C. V průběhu tavení jsou odebírány zkušební vzorky, následně ochlazeny, aby mohly být podrobeny analýze na rentgenovém spektrometru. Výsledky analýzy vypovídají o správném procentuálním složení směsi. [14]

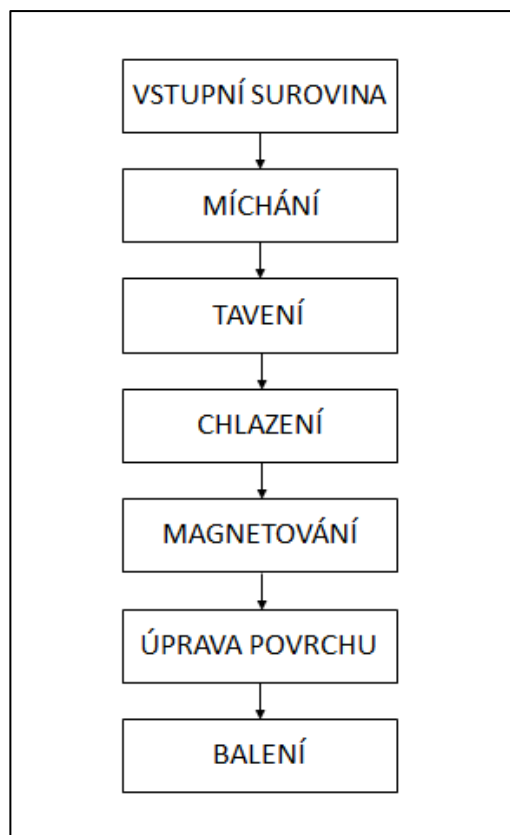
Roztavená směs je nalitá do forem a následně zahřátá na velmi vysokou teplotu a umístěna do magnetizéru, kde v přítomnosti silného magnetického pole chladne. [14]

Zmagnetizovaný výrobek je temperován a stabilizován v temperovacích pecích po dobu několika dní, následně vložen do cívky elektromagnetu nebo magnetizéru. Zde je elektrickým impulzem vygenerováno magnetické pole potřebné pro úplné a permanentní zmagnetování. [14]

Vyrobený magnet je potřeba broušením opracovat do požadovaných rozměrů. Magnet požadovaných rozměrů je poté testován na přístrojích měřících intenzitu magnetického pole (gaussmetr, magnetometr). [14]

Po výstupní kontrole jsou výrobky zabaleny a připraveny k expedici. Každý obal musí být vybaven údajem potřebným pro přejímku a případnou reklamaci zboží (adresa výrobce, počet kusů, identifikační kód, datum výroby atd.) [1][14]

Zkrácený popis výroby AlNiCo magnetu dle metody slévání je popsán na obr. 7.



Obr. 7: Schématický náčrt výroby AlNiCo magnetu dle metody slévání

Metoda spékání:

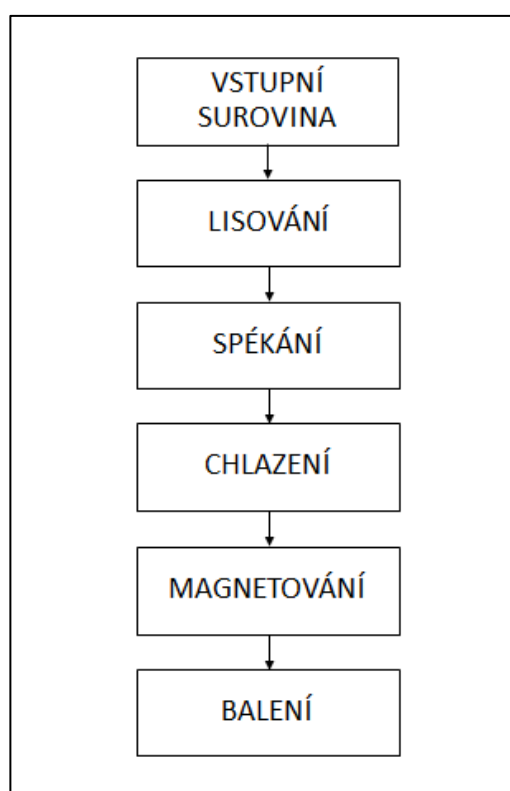
Jemně mletý prášek se pod vysokým tlakem lisuje v matrici, která je velmi podobná magnetu požadovaného tvaru. [14]

Po vylisování je materiál spékán v peci v atmosféře vodíku za 1200 °C. Tímto procesem jsou veškeré částice uvnitř matrice spojeny. [14]

Horký materiál je pak ochlazen buď za přítomnosti vnějšího magnetického pole nebo bez přítomnosti vnějšího magnetického pole. Pokud je chlazen za působení vnějšího magnetického pole, bude mít magnet anizotropní vlastnosti a bude silnější. Pokud nebude vložen do působení vnějšího magnetického pole, bude izotropní. [14]

AlNiCo magnety vyrobené metodou spékání nepotřebují dodatečné úpravy, magnetizují se a expedují. [14]

Zjednodušený popis výroby AlNiCo magnetu pomocí této metody je znázorněn na obr. 8.



Obr. 8: Schématický náčrt výroby AlNiCo magnetu metodou spékání

2.7 Výrobní proces magneticky tvrdého feritového magnetu ve firmě Feromagnet

Firma Feromagnet, s.r.o. je jedinou firmou ve střední Evropě vyrábějící magnety všech typů. Jedná se o moderní výrobně - obchodní společnost s více než padesáti zaměstnanci, vizí trvalého rozvoje a snahou neustále zlepšovat své výrobky a služby. V současné době ve firmě připravují zprovoznění nové výrobní linky na výrobu feritového prachu.

Svou výrobní činností firma navázala na tradiční výrobu tvrdých feritových magnetů. [25]

Hodnoty magnetických veličin výrobků firma uvádí v příslušných materiálových listech. [1] Výrobně technické poznatky, znalosti a zejména zkušenosti z výroby tvrdých feritových magnetů jsou součástí know - how firmy.

Diplomová práce se zabývá výrobním procesem tvrdého feritového magnetu ve fázi suchého mletí na vibračním mlýně VM 500.

Vibrační mlýn VM 500 je kontinuální tyčový dvoustupňový mlýn sestávající ze dvou pod sebou umístěných válců, ve válcích jsou nainstalovány ocelové tyče o dvou rozličných rozměrech. V horním válci se nacházejí tyče o průměru 30 mm a délce 1998 mm, ve spodním válci tyče mají průměr 20 mm a délku 1998 mm. [26] Velikost namleté neshodné suroviny potřebná pro výrobu magnetu je do 1 μm . Po tomto suchém mletí následuje proces mletí mokrou cestou. Mletí jako takové je operace, při které dochází k rozmělnování částic. Suché mletí probíhá bez přídavku jakékoli kapaliny, jeho předností je eliminace energeticky a mnohdy i technologicky náročného procesu sušení výsledného materiálu. Mokré mletí bývá více efektivní, ale je finančně náročnější.

Vstupní materiál ve tvaru kuliček v různých velikostních rozměrech do 2 cm je do mlýna dávkován ze zásobníku šnekovým dopravníkem. Zásobník je nádoba obdélníkového tvaru opatřená otvorem sloužící pro propad vstupní suroviny do šnekového dopravníku. Otvor je umístěn v první polovině zásobníku s nulovým sklonem. Otvorem putuje surovina do šnekového dopravníku, který je intervalově uváděn v činnost pomocí časových spínačů. Nastavení spínačů – čas činnosti a prodlevy šneku - určuje mistr provozu. [26]

3 CHARAKTERISTICKÉ VLASTNOSTI ODPADU

Diplomová práce se zabývá charakteristickými vlastnostmi odpadu při výrobě feritového magnetu s ohledem na jeho následné zařazení do výroby.

Při výrobě feritových magnetů vznikají neshodné výrobky, magnety, které neodpovídají požadovaným parametrům. Tento odpad se ve výrobním procesu využívá jako druhotná surovina.

Neshodné výrobky se operací suchého mletí rozmělnují ve vibračním tyčovém mlýně na produkt s určitou velikostí částic.

3.1 Práce na vibračním mlýně ve firmě Feromagnet

Experimentální práce začala na kontinuálním tyčovém dvoustupňovém vibračním mlýně VM 500 ve firmě Feromagnet a byla zaměřena na odebrání vzorků namletých částic za účelem stanovení hmotnostního průtoku a na proměření konečné jemnosti zrna (granulometrická analýza).

Před vlastním procesem mletí zařízení (vibrační mlýn VM 500) nastavil a vstupní surovinu (viz obr. 9) zkontroloval expert provozu.



Obr. 9: Vstupní surovina

Zvolil nastavení doporučené výrobcem, tj. střední nastavení doby dávkování a střední hodnota nastavení doby mezi dávkováním. Spustil samotné mletí. Doba mletí suroviny byla 30 minut. Po dokončení experimentu bylo požadované množství namletého materiálu odebráno do nádoby a zváženo. Zjištěné hodnoty, hmotnost množství požadovaného materiálu a čas potřebný k namletí požadovaného množství materiálu, byly zaznamenány do laboratorního deníku, z nich byl vypočítán hmotnostní průtok (vyjadřuje hmotnost materiálu, která za časovou jednotku projde mlecím zařízením).

Mlecí experimenty byly provedeny celkem 10krát s tím, že každé další nastavení doby dávkování na zařízení bylo odlišné a prováděno experimentátorem v součinnosti s expertem výroby.

Zvážený materiál, vzorek, byl následně přesypán do sáčků. Sáčky byly očíslovány dle pořadí odběru od 1 do 10. Vzorek č. 1 viz tabulka č. 1 představuje materiál odebraný při nastavení mlýnu na minimální dobu dávkování.

Tabulka č. 1: Popis odebraných vzorků

Vzorek	Nastavení doby dávkování
Vzorek č. 1	minimální hodnota
Vzorek č. 2	postupný nárůst
Vzorek č.3	postupný nárůst
Vzorek č. 4	postupný nárůst
Vzorek č. 5	střední hodnota
Vzorek č. 6	postupný nárůst
Vzorek č. 7	postupný nárůst
Vzorek č. 8	postupný nárůst
Vzorek č. 9	postupný nárůst
Vzorek č. 10	maximální hodnota

Tabulka ukazuje, jak nastavená doba dávkování postupně u jednotlivých vzorků v pravidelných intervalech narůstá od minimální hodnoty doby dávkování (Vzorek č. 1) až po maximální dobu dávkování (Vzorek č. 10). Hodnota nastavení doby mezi dávkováním zůstala po celou dobu měření konstantní.

Z těchto hodnot byl zpracován hmotnostní průtok, který je uveden v následující tabulce č. 2.

Tabulka č. 2: Znázornění hmotnostních průtoků jednotlivých odebraných vzorků

Vzorek	Hmotnostní průtok [kg.s ⁻¹]
Vzorek č. 1	0,02042
Vzorek č. 2	0,01630
Vzorek č. 3	0,07154
Vzorek č. 4	0,07093
Vzorek č. 5	0,05581
Vzorek č. 6	0,02388
Vzorek č. 7	0,01440
Vzorek č. 8	0,03335
Vzorek č. 9	0,01422
Vzorek č. 10	0,05242

Hodnoty hmotnostního průtoku u jednotlivých vzorků jsou proměnlivé a nejsou přímo úměrné narůstající době dávkování. Nejvyšší hodnota hmotnostního průtoku byla naměřena u Vzorku č. 3, následuje hodnota u Vzorku č. 4 a č. 5. Nejnižší hodnotu hmotnostního průtoku prokazuje měřený Vzorek č. 9.

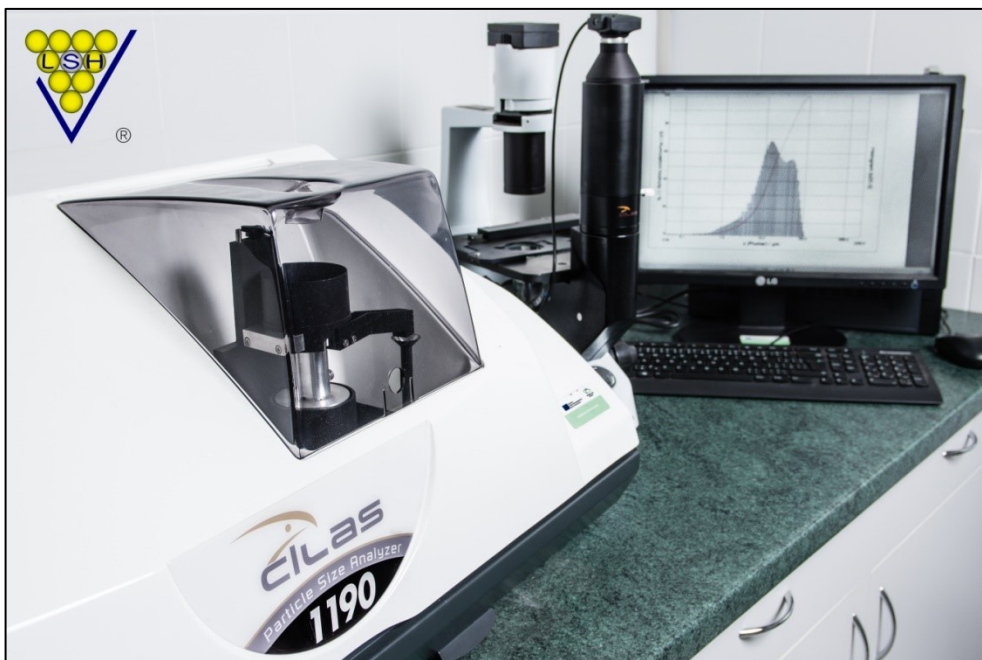
3.2 Granulometrická analýza vzorků odebraných ve firmě Feromagnet

Experimentální část práce pokračovala v Laboratoři sypkých hmot (LSH) vědecko-technického pracoviště Centra ENET, Vysoké školy báňské – Technické univerzity. Laboratoř je určena ke studiu procesů u sypkých hmot. Jsou zde řešeny úkoly z oblasti výroby, třídění, zdrobňování, skladování a dopravy sypkých hmot. [17]

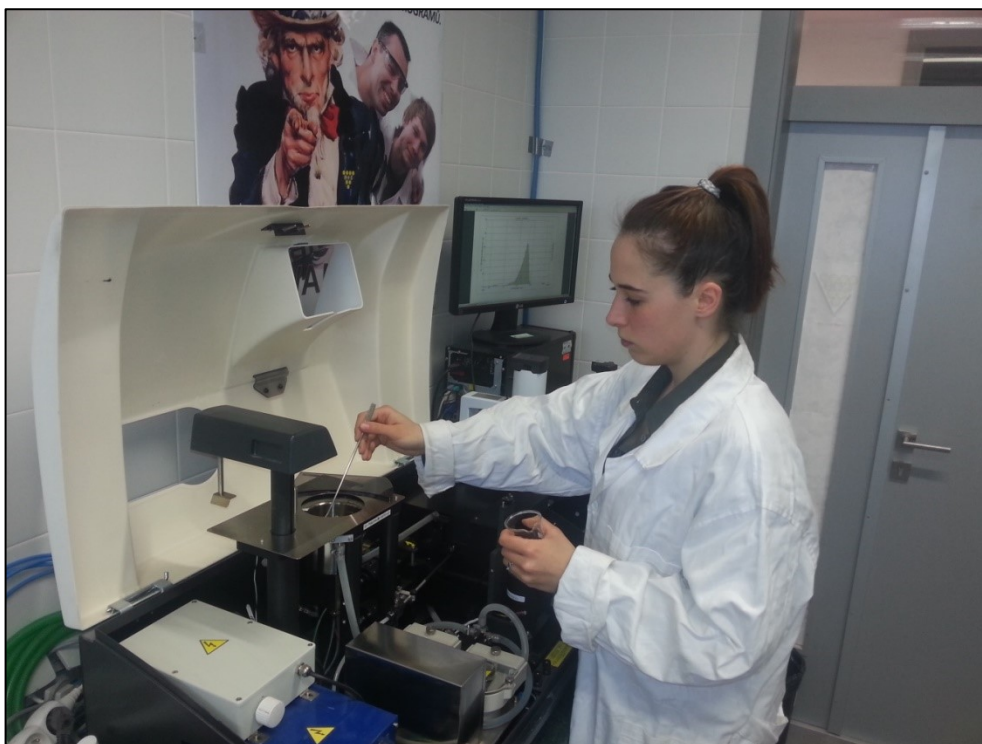
V laboratoři byla sada deseti vzorků proměřena na velikost částic a jejich chování pod mikroskopem.

Pro měření velikosti částic neboli granulometrickou analýzu byl použit laserový analyzátor velikosti částic CILAS 1190.

Přístroj a práci na něm znázorňují obr. 10 a obr. 11.



Obr. 10: Analyzátor částic značky CILAS v laboratoři centra sypkých hmot školy VŠB - TU Ostrava [18]



Obr. 11: Práce na laserovém analyzátoru velikosti částic CILAS 1190

Přístroj analýzu velikosti částic provádí pomocí laserového rozptylu suchou nebo kapalnou cestou. Pro měření našeho namletého materiálu byla aplikována kapalná cesta.

Pro kapalný způsob měření je analyzátor vybaven: cirkulací pomocí peristaltické pumpy, mechanickým míchadlem, regulovatelným ultrazvukem s nastavitelným časováním, nerezovým 400 ml zásobníkem na cirkulační kapalinu s možností částečného plnění, videokamerou s mikroskopem. [18][19][20]

Před začátkem měření mokrou cestou bylo potřeba určit vhodné unášecí médium v závislosti na chemických a mechanických vlastnostech vzorku. Pro tyto vzorky byl zvolen ethanol. Přístroj připravil a samotné měření, včetně „rozbití“ namletého materiálu ultrazvukem (rozdělení shluků na jednotlivé částice), provedl specialista. Každý jednotlivý vzorek byl přístrojem změřen 3krát. Ze všech tří výsledných hodnot byla vypočítána průměrná hodnota a zaznamenána.

Výsledkem měření je tabulka velikosti částic v mikrometrech a kumulativní křivka distribuce velikosti částic v procentech.

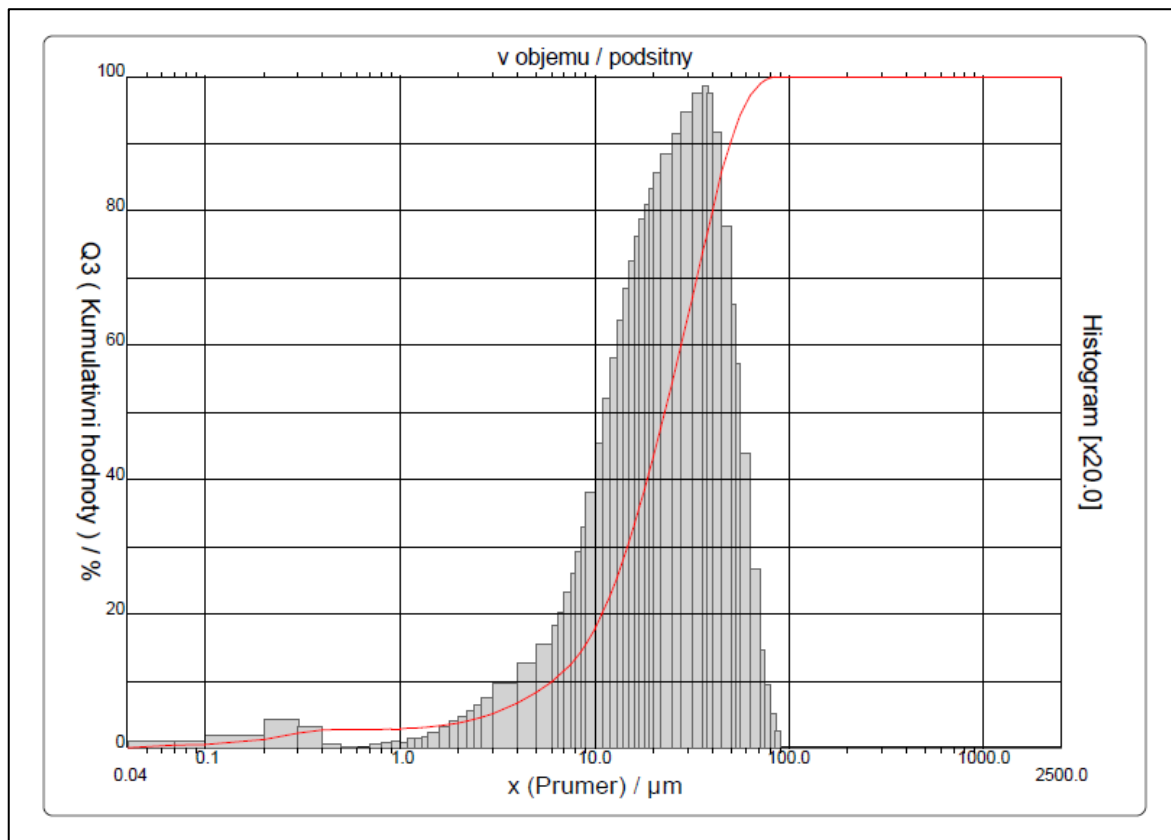
Měření prokázala, že velikost zrna v závislosti na době dávkování materiálu byla nejmenší u Vzorku č. 3 s hodnotou 19,78 μm . Největší hodnota zrna byla naměřena u Vzorku č. 9, tj. 28,50 μm . Vzorek č. 5 měl hodnotu 21,47 μm . U ostatních vzorků naměřené hodnoty zrna kolísaly.

Proměnlivý vývoj velikosti částic v závislosti na době dávkování materiálu ukazuje tabulka č. 3.

Tabulka č. 3: Ukázka proměnlivého vývoje velikosti částic namletého materiálu

Vzorek	Nastavení doby dávkování	Velikost zrna [μm]
Vzorek č. 1	minimální hodnota	21,53
Vzorek č. 2	postupný nárůst	22,09
Vzorek č. 3	postupný nárůst	19,78
Vzorek č. 4	postupný nárůst	26,22
Vzorek č. 5	střední hodnota	21,47
Vzorek č. 6	postupný nárůst	27,83
Vzorek č. 7	postupný nárůst	25,79
Vzorek č. 8	postupný nárůst	25,89
Vzorek č. 9	postupný nárůst	28,50
Vzorek č. 10	maximální hodnota	28,18

Graf kumulativní křivky, který je výsledkem měření na přístroji CILAS viz obr. 12. ukazuje hodnoty objemu částic ve vzorku v procentech vzhledem k velikosti částice v μm a distribuci hustoty vzorku v objemu. [18]



Obr. 12: Kumulativní křivka vzorků mletých ve firmě Feromagnet

Měření vzorků zrna ukázalo, že kumulativní křivky vzorků jsou ve většině případů měření obdobné. Graf kumulativní křivky je dvouvrcholový. První vrchol dosahuje hodnoty od 0,2 do 1 μm , druhý vrchol dosahuje hodnot v rozmezí 20 – 30 μm .

Ze zjištěných hodnot lze usuzovat, že ve vzorku působí vnitřní síly, dochází k agregaci neboli tvorbě shluků.

Příčina proměnlivosti velikosti částic by mohla být způsobena nepřiměřeně nastavenou dobou mletí a neadekvátními podmínkami technologického procesu mletí. Aby se tato domněnka potvrdila, byl nasimulován proces mletí vstupní suroviny, neshodných výrobků vznikajících při výrobě magnetů, ve výukové laboratoři Institutu environmetálního inženýrství VŠB-TU Ostrava.

3.3 Simulace procesu mletí na vibračním mlýně v laboratoři VŠB – TU Ostrava

Pro simulaci procesu mletí byl použit vibrační mlýn výukové laboratoře Institutu environmentálního inženýrství VŠB – TU Ostrava viz obr. 13.



Obr. 13: Vibrační mlýn výukové laboratoře Institutu environmentálního inženýrství VŠB – TU Ostrava

Experimentální práce na laboratorním vibračním mlýnu probíhala v kompetenci experimentátora. V první řadě byla zkontrolována čistota mlecího tělesa, nečistoty odstraněny papírovým ubrouskem. Následovalo odvážení potřebného množství vstupního materiálu poskytnutého firmou Feromagnet, s.r.o. (158,61 g).

Mlecí těleso bylo sestaveno tak, aby byly jednotlivé mlecí kotouče rozestavěny přesně doprostřed. Vstupní materiál ve tvaru kuliček (viz obr. 14), byl přímo do mlecího tělesa vložen tak, aby jednotlivé kuličky nezamezily pohybu vnitřního pohyblivého kruhu mlecího tělesa. Poté bylo mlecí těleso i s materiálem pečlivě uzavřeno vrchním dílem (víkem) a vloženo do vibračního mlýnu. Ve vibračním mlýnu bylo vibrační těleso pevně uchyceno mezi 6 pružin. Po uzavření víka vibračního mlýnu byla nastavena požadovaná doba a frekvence mletí. Stiskem tlačítka start byl spuštěn samotný proces mletí.



Obr. 14: Vstupní surovina

Po dokončení prvního mlecího experimentu byl vibrační mlýn otevřen, vibrační těleso opatrně odmontováno a poté vyjmuto. Ze stěn jednotlivých mlecích kotoučů byly na filtrační papír důkladně štětečkem oprášeny jemnější částice. Potom následovalo vysypání veškerého materiálu z mlecího tělesa na filtrační papír a důkladné vyčistění tělesa. Bylo nezbytné přesypat na filtrační papír všechnen materiál, aby informace o namletí byla kompletní. Takto připravené díly mlecího tělesa byly nachystány k dalšímu použití.

Mlecí experimenty byly prováděny celkem 7 krát při postupně narůstající době mletí od 5 do 60 minuty v intervalech 5, 10, 20, 30, 40, 50 a 60 minut. K odměřování časových intervalů byly využity stopky. Mezi jednotlivými mlecími experimenty se opakovalo přesypání veškerého materiálu z mlecího tělesa na filtrační papír a důkladné vyčistění tělesa.

Obr. 15 prokazuje, že namletý materiál byl po 5 minutách mletí téměř neporušen a příliš se nelišil od vstupního materiálu, kuliček. Vibrační proces narušil měrný povrch

materiálu jen u minimální části vzorku a nedosahoval předpokládaného rozsahu velikosti částic. Většina mletých částic zůstala v původní charakteristické velikosti.



Obr. 15: Stav vstupní suroviny po 5 minutách mletí – naprosto neporušena

Materiál byl za stejných podmínek znovu umístěn do mlecího tělesa a podroben dalšímu mletí s časovým intervalem 10 minut.

Vizuální kontrola namletého vzorku značila vyšší míru narušení měrného povrchu materiálu, avšak zdaleka nedosahovala požadované homogenity směsi. Jednoznačně i nadále převažovaly původní pevné částice, jak lze sledovat na obr. 16.



Obr. 16: Vstupní surovina po 10 minutách mletí – patrné narušení některých kuliček

K dosažení potřebné velikosti částic bylo žádoucí pokračovat v mletí. Čas mletí byl prodloužen o dalších 10 minut, tedy celkově na dobu 20 minut. Mezi jednotlivými mlecími experimenty se opakovalo přesypání veškerého materiálu z mlecího tělesa na filtrační papír a důkladné vyčištění tělesa.

Po této operaci se opět zmenšil měrný povrch materiálu, narušení bylo viditelnější a přibýlo částic potřebné velikosti. Většina materiálu ovšem zůstala v nepřiměřeném rozměru, od předchozí operace se zásadně nelišila a v žádném případě vizuálně neodpovídala požadované velikosti částic. Výsledek tohoto procesu je zaznamenán na fotografii v obr. 17.



Obr. 17: Feritové kuličky po 20 minutách mletí – nárůst distribuce velmi jemných částic, patrnější porušení

Výsledek operace v předchozích časových intervalech byl zásadně neuspokojivý. Pokračovalo mletí produktu za celkové doby 30 minut s dodržением již zmiňovaného pracovního postupu (vyprázdnění a vyčištění mlecího tělesa, dávkování materiálu, upevnění mlecího tělesa do vibračního mlýna bez přidavku jakékoli kapaliny).

Vizuální kontrola namletého vzorku prokazovala, že produkt získal mletím potřebnou velikost částic. Z původního materiálu, kuliček v rozměrech do 2 cm, vznikla směs velmi jemných částic. Snímek na obr. 18 dokazuje dosažení potřebného výsledku jednotkové operace.



Obr. 18: Vstupní surovina namletá na velmi jemné částice

Z namleté suroviny na velmi jemné částice byl kvartací laboratorní lžičkou odebrán 1g materiálu do připraveného polyethylenového ZIP sáčku a popsán jako Vzorek č. 1. Tento byl připraven pro laboratorní účely – granulometrickou analýzu a rentgenovou difrakční analýzu.

Zbylá namletá surovina byla zpět navracena do mlecího tělesa. Následovalo další desetiminutové mletí. Po celkové době trvání mlecí operace 40 minut byl materiál pečlivě vyjmut z vibračního mlýnu na filtrační papír, kvartací odebrán 1g materiálu do polyethylenového ZIP sáčku a označen jako Vzorek č. 2 určený pro granulometrickou analýzu.

Zůstatek suroviny byl nasypán zpět do mlecího tělesa a podroben stejnému procesu po dobu 50 minut. Následnou kvartací s odběrem materiálu do polyethylenového ZIP sáčku označeném jako Vzorek č. 3 byl připraven pro potřeby granulometrické analýzy.

Poslední mletí suroviny trvalo celkově 60 minut. I zde následovala kvartace s odběrem materiálu do polyethylenového ZIP sáčku s označením Vzorek č. 4.

Ke granulometrické analýze byly celkově připraveny 4 vzorky:

- z 30. minuty mletí - Vzorek č. 1
- ze 40. minuty mletí - Vzorek č. 2
- z 50. minuty mletí - Vzorek č. 3
- z 60. minuty mletí - Vzorek č. 4

3.4 Granulometrická analýza vzorků odebraných při simulovaném procesu mletí

Granulometrická analýza byla realizována v Laboratoři sypkých hmot (LSH) vědecko-technického pracoviště Centra ENET, Vysoké školy báňské – Technické univerzity.

V laboratoři byly proměřeny 4 vzorky na velikost částic a jejich chování pod mikroskopem. K měření byl použit tentýž laserový analyzátor velikosti částic CILAS 1190.

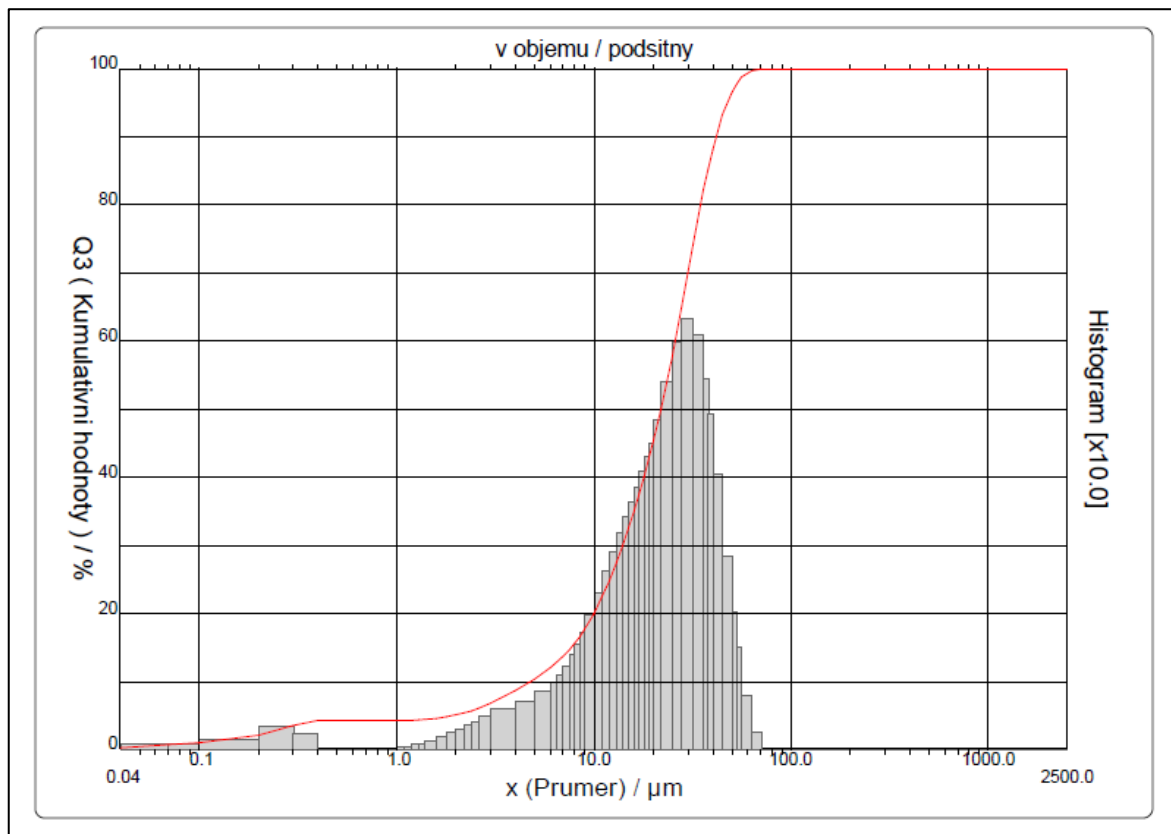
Přístroj k samotnému měření připravil a měření provedl specialista. Jako unášecí medium byl použit ethanol. Měření probíhalo u každého vzorku 4krát. Ze všech čtyř výsledných hodnot měření byla vypočítána průměrná hodnota měření a zaznamenána.

Nejmenší velikosti zrna byla zjištěna u Vzorku č. 2 s hodnotou 20,75 μm a dobou mletí 40 minut. Největší hodnota byla naměřena u Vzorku č. 4, tj. 27,61 μm a dobou mletí 60 min. U ostatních vzorků naměřené hodnoty kolísaly. Proměnlivý vývoj velikosti částic v závislosti na době dávkování materiálu ukazuje tabulka č. 4.

Tabulka č. 4: Proměnlivý vývoj velikosti částic namletých vzorků

Vzorek	Velikost zrna [μm]	Doba mletí [min]
Vzorek č. 1	26,49	30
Vzorek č. 2	20,75	40
Vzorek č. 3	27,33	50
Vzorek č. 4	27,61	60

Kumulativní křivka viz obr. 19 ve většině případů opět ukazuje dvouvrcholový graf. První vrchol dosahuje hodnot od 0,2 do 1 μm , druhý vrchol dosahuje hodnot v rozmezí 20 - 30 μm .



Obr. 19: Kumulativní křivka vzorků z procesu simulace mletí

Ze zjištěných hodnot lze usuzovat, že ve vzorku působí vnitřní síly a dochází tak ke tvorbě shluků neboli agregací.

Aby byla tato domněnka potvrzena, byly veškeré odebrané vzorky analyzovány pod mikroskopem, přídatným zařízením analyzátoru částic CILAS 1190, který je součástí vybavení Laboratoře sypkých hmot (LSH) vědecko-technického pracoviště Centra ENET, Vysoké školy báňské – Technické univerzity.

3.5 Mikroskopie všech odebraných vzorků

Mikroskopie všech vzorků odebraných z vibračního mlýna ve firmě Feromagnet a ze simulačního mletí probíhala v Laboratoři sypkých hmot (LSH) na přístroji CILAS 1190, který je vybaven přídatným zařízením, videokamerou s mikroskopem viz obr. 20. Pomocí tohoto zařízení bylo možno zjistit stav tvorby shluků, hlavní rozměr částic a zkvalitnit tak

výsledky zkoumání. Přídavné zařízení přístroje je přiměřené případu měření nepravidelných částic, tedy i zkoumaného nepravidelně namletého magnetického materiálu. [19]



Obr. 20: Videokamera s mikroskopem značky CILAS [21]

Před začátkem mikroskopování byly vzorky podrobeny „rozbití“ shluků na menší částice pomocí ultrazvuku. Práce byla provedena experimentátorem tak, že do skleněné kádinky naplněné 80 ml vody byl nasypán 1g vzorku. Laboratorní lžičkou byl vzorek ve vodě promíchán a kádinka se vzorkem byla umístěna do ultrazvukové vany. Ultrazvuková vana je kovová nádrž vyrobená z nerezové oceli, kde pomocí ultrazvukového signálu došlo v časovém intervalu 2 minut k poškození shluků ve vzorku.

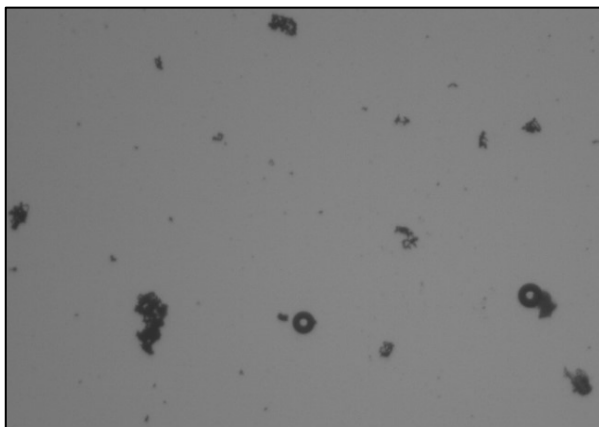
Poté byla kádinka s připraveným vzorkem vyjmuta, kapka vzorku byla přemístěna na čisté podložní sklíčko a následovalo vlastní mikroskopování prováděné experimentátorem.

Podložní sklíčko se vzorkem bylo umístěno na stolek mikroskopu. Makrošroubem a mikrošroubem bylo zaostřeno a byl vytvořen snímek.

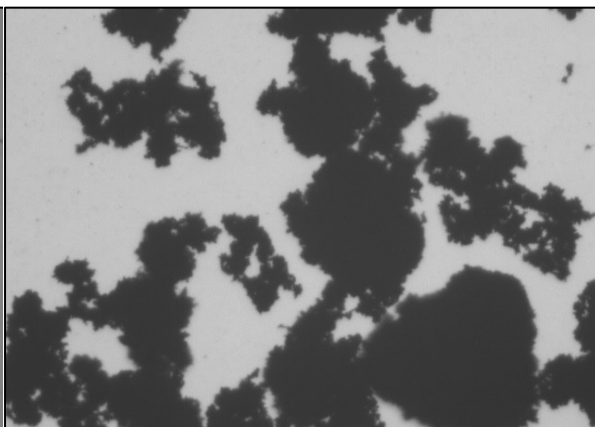
Celý postup byl za stejných podmínek proveden na 14 vzorcích (10 vzorků z firmy Feromagnet a 4 vzorky ze simulovaného procesu mletí).

Na obr. 21 až obr. 30 jsou snímky vzorků, které byly připraveny z namletého materiálu ve vibračním mlýně firmy Feromagnet.

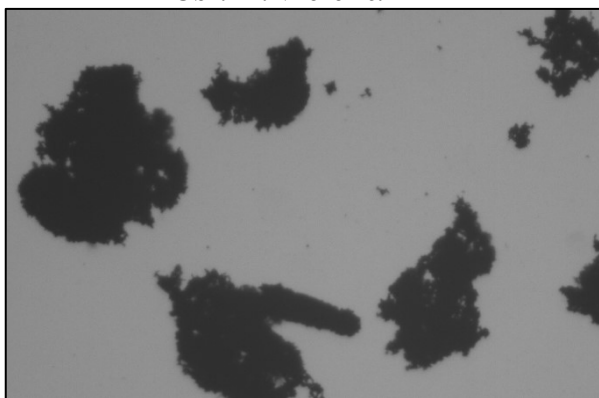
Snímky mikroskopování jednotlivých vzorků prokázaly, že namleté částice tvoří velikostně proměnlivé shluky, agregáty. Velikost shluků, agregátů byla u jednotlivých vzorků různá nezávisle na sledovaných podmínkách mletí tj. na době mletí a na době dávkování. Průběžným mikroskopickým sledováním bylo možno monitorovat, že menší částice se kumulovaly k bezprostředně nejbližším agregátům.



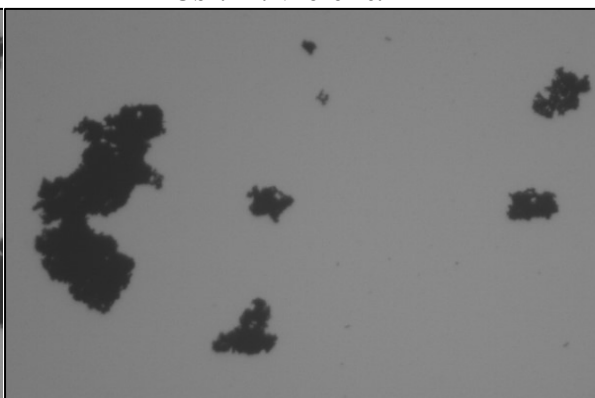
Obr. 21: Vzorek č. 1



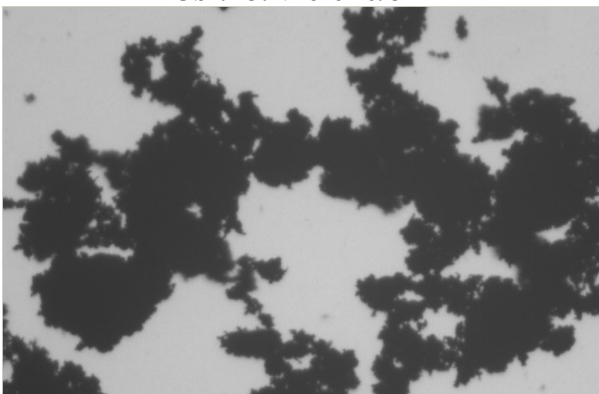
Obr. 22: Vzorek č. 2



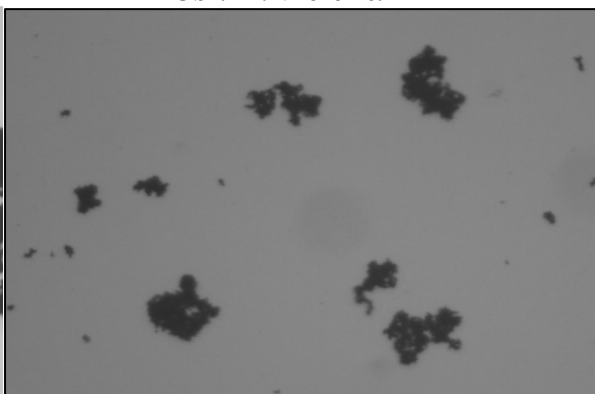
Obr. 23: Vzorek č. 3



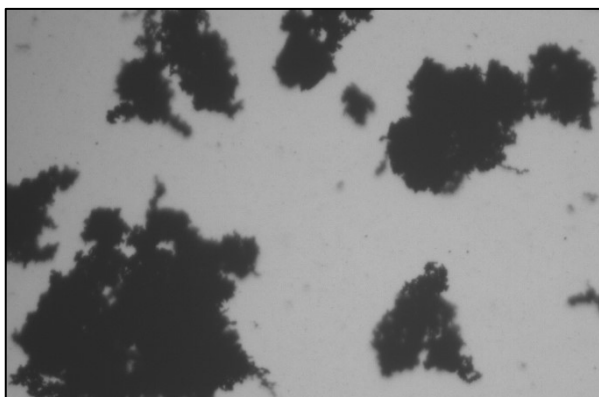
Obr. 24: Vzorek č. 4



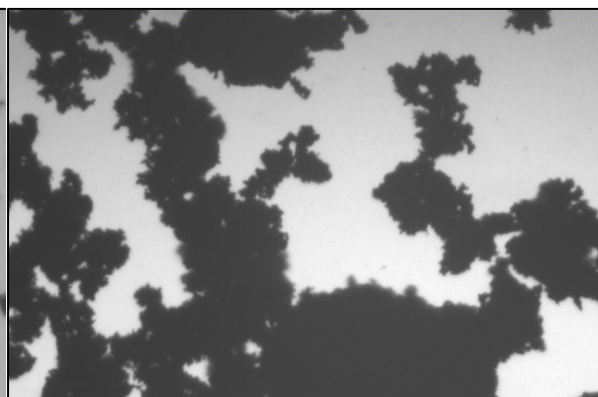
Obr. 25: Vzorek č. 5



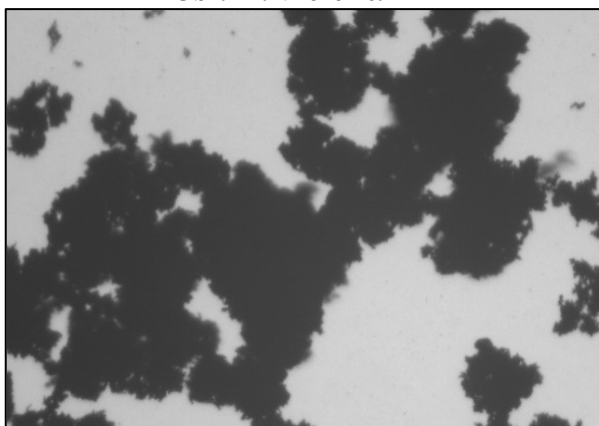
Obr. 26: Vzorek č. 6



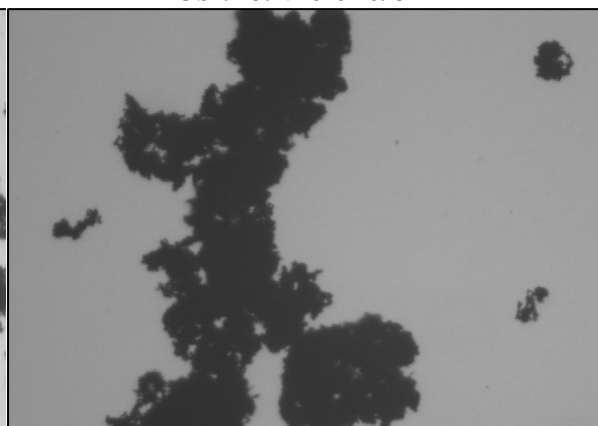
Obr. 27: Vzorek č. 7



Obr. 28: Vzorek č. 8

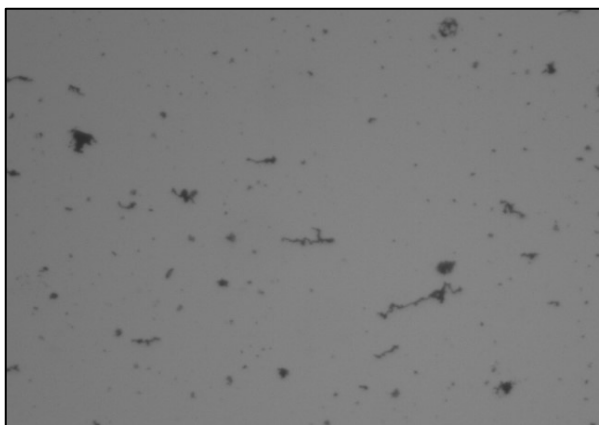


Obr. 29: Vzorek č. 9

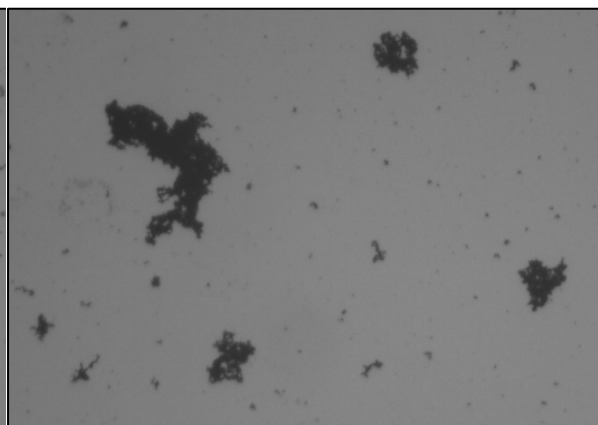


Obr. 30: Vzorek č. 10

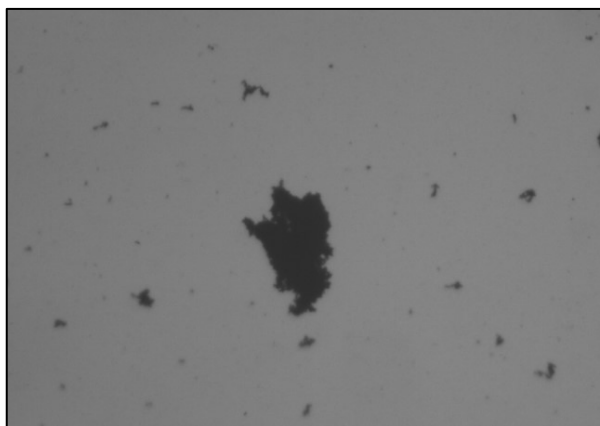
Na obr. 31 až obr. 34 jsou snímky vzorků získaných ze simulace mletí. Výsledky mikroskopování jednotlivých vzorků prokázaly, že částice tvoří velikostně proměnlivé shluky. Velikost agregátů byla u jednotlivých vzorků různá. Průběžným mikroskopickým sledováním bylo možno monitorovat, že menší částice se kumulovaly k bezprostředně nejbližším agregátům.



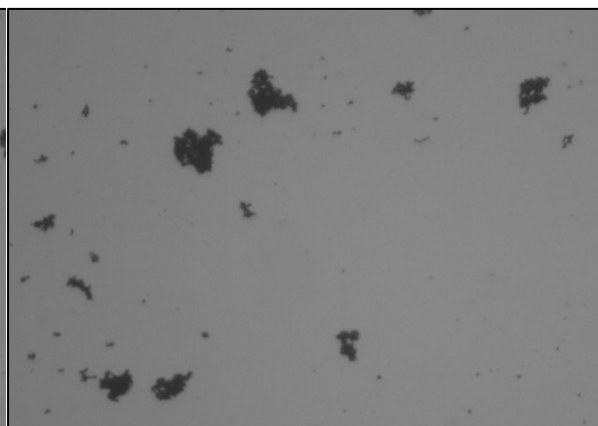
Obr. 31: Vzorek č. 1



Obr. 32: Vzorek č. 2



Obr. 33: Vzorek č. 3



Obr. 34: Vzorek č. 4

3.6 Rentgenová prášková difrakce

Tato část experimentu probíhala v Laboratoři Institutu čistých technologií těžby a užití energetických surovin Vysoké školy báňské – Technické univerzity měřením na špičkovém práškovém difraktometru Bruker Advence D8 (obr. 35). Přístroj je určen ke kvalitativním a kvantitativním analýzám vzorků nejrůznějšího původu a složení. Analýzy byly prováděny specialistou. [24]

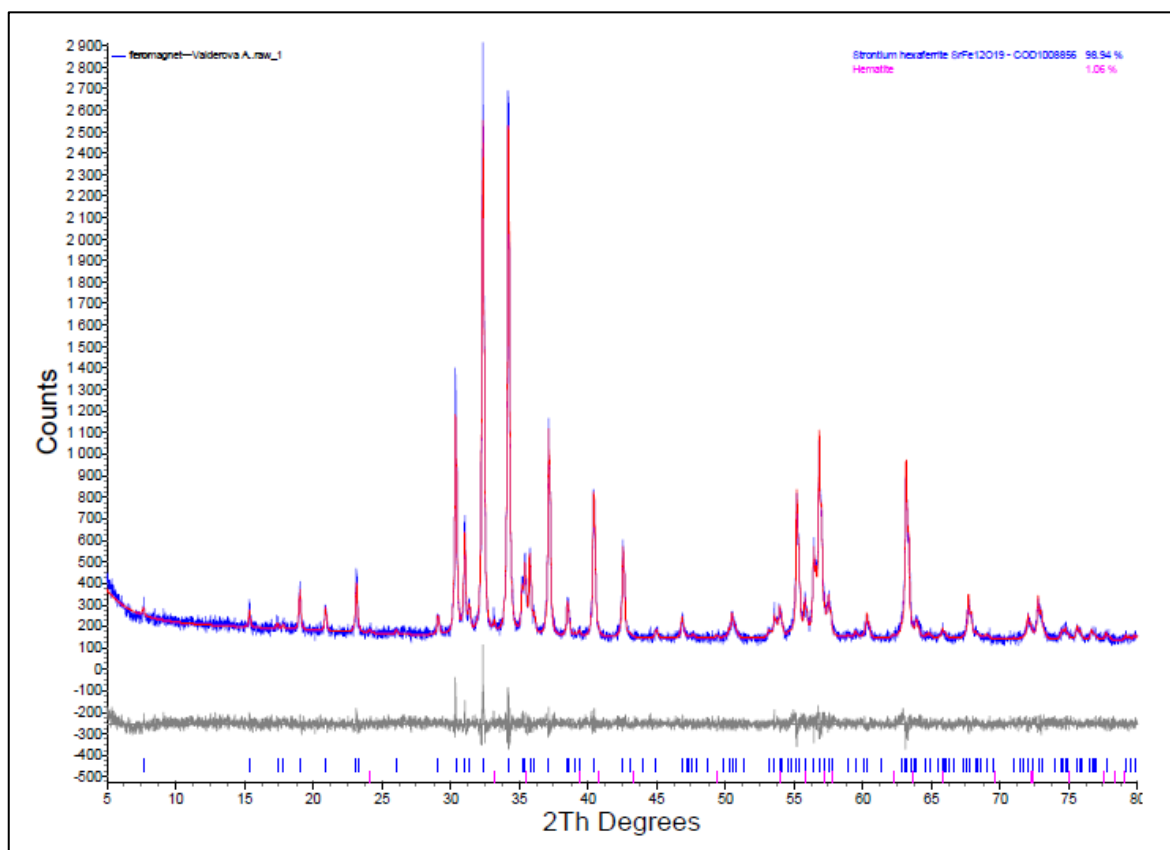


Obr. 35: Práškový difraktometr Bruker Advence D8 [24]

Metoda rentgenové práškové difrakce spočívá ve využití rentgenového záření na měření difrakčních záznamů (difrakčních píků) a prvkového složení dodaných vzorků. Rentgenové záření dopadá na povrch vzorku, na němž dochází k difrakci (ohybu) na

elektronech jednotlivých atomů vzorku. Analýzou difraktovaného záření lze stanovit strukturu a složení vzorku. Výsledkem měření je graf, difraktogram. [22][23]

Na obr. 36 je znázorněn difraktogram namletého vstupního materiálu. Na ose x je vyznačena poloha detektoru a na ose y je intenzita difraktovaného záření zaznamenaná detektorem [22].



Obr. 36: Difraktogram vstupní suroviny – feromagnetu tzv. stroncia hexaferitru, $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$

Dle rentgenové difrakční analýzy je namletý vstupní materiál, feromagnet tzv. stroncium hexaferit, $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$, což je základní složka permanentních magnetů.

4 ANALÝZA A VYHODNOCENÍ

Diplomová práce řeší problematiku optimálních podmínek zpracování feritového magnetu ve fázi suchého mletí.

Na počátku práce byl stanoven problém, zda lze dosáhnout ve fázi suchého mletí odpadu velikosti zrna do 1 μm , optimálně 0,8 μm (konzultace s experty výroby).

Pro hledání odpovědi na problém byla využita metoda měření hmotnostního průtoku, měření velikosti zrna a optické mikroskopie s aplikací rentgenové práškové difrakce, která charakterizovala složení vstupního měřeného vzorku. Byly analyzovány hodnoty hmotnostního průtoku a granulometrické analýzy vzhledem k nastavené době dávkování vzorku.

4.1 Práce na vibračním mlýně ve firmě Feromagnet

Tato část experimentu, práce na kontinuálním tyčovém dvoustupňovém mlýně VM 500, byla zaměřena na sledování mlecího procesu s odebráním vzorků za určitých podmínek (viz kapitola 3.1) a na vyhodnocení hmotnostního průtoku.

Bylo zaznamenáno, že dochází k nerovnoměrnému dávkování množství suroviny či ulpívání suroviny na stěnách zásobníkového otvoru.

Lze se domnívat, že tyto jevy mohou být zapříčiněny nevhodně nastaveným sklonem zásobníku a příliš úzkým průměrem otvoru dávkování vstupní suroviny do šnekového dopravníku.

Hodnoty hmotnostního průtoku, který byl měřen metodikou – viz kapitola 3.1, prokázaly, že nejvyšší hodnota hmotnostního průtoku byla zaznamenána u Vzorku č. 3 a hodnota Vzorku č. 5 se od Vzorku č. 3 lišila jen minimálně.

4.2 Granulometrická analýza vzorků odebraných ve firmě Feromagnet

K popisu zrnitosti prostřednictvím granulometrického měření byla použita velikost částic a kumulativní charakteristika.

Velikost částic byla kolísavá a jejich proměnlivost je zaznamenána v tabulce č. 3 v kapitole 3.2.

Ze zjištěných hodnot bylo odvozeno, že nastavená doba mletí a podmínky technologického postupu mohou být nepřiměřené zvolené. Vyslovenou hypotézu, že doba mletí a technologické podmínky byly nepřiměřeně nastaveny následně vyloučila simulace procesu mletí.

Charakteristika vzorků dle rozboru kumulativní křivky byla ve většině případů obdobná, tzn. dvouvrcholová (viz obr. 12 v kapitole 3.2). První vrchol značí velikost zrna do 1 μm , druhý vrchol je v rozmezí 20 – 30 μm .

Tento výsledek naznačuje skutečnost, že vibrační mlýn dokáže vstupní surovinu rozmělnit na částice o velikosti do 1 μm . Současně upozorňuje na problém shlukování částic, aglomeraci.

4.3 Analýza a porovnání hodnot hmotnostního průtoku a granulometrické analýzy

Naměřená hodnota hmotnostního průtoku byla nejvyšší u Vzorku č. 3 s dobou dávkování mezi minimální a střední hodnotou. Vzorek č. 3 současně disponuje nejnižší velikostí namletého zrna. Vzorek č. 5, který byl odebrán při současně osvědčeném procesu mletí, má hodnoty, které se přibližují hodnotám u Vzorku č. 3. Optimální velikost zrna nebyla dosažena u žádného vzorku.

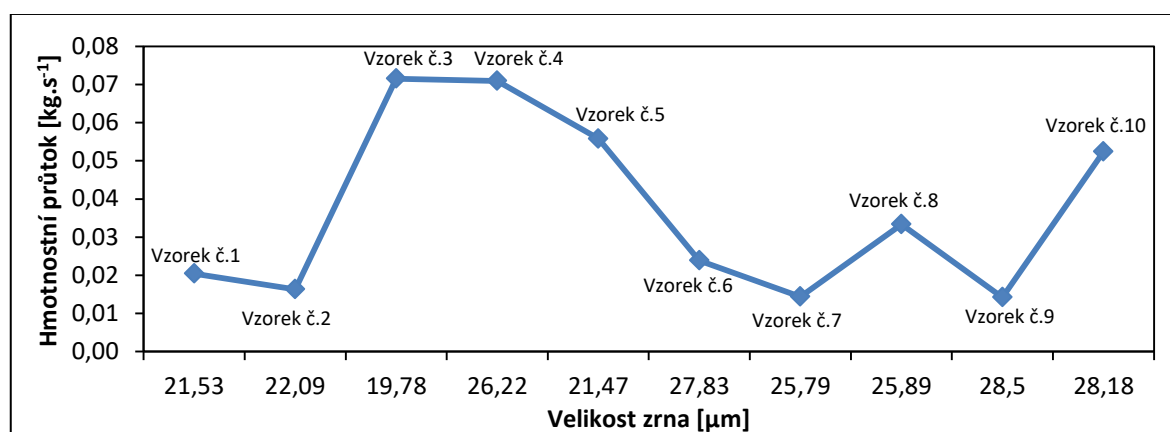
Tento výsledek vypovídá o tom, že stávající nastavení vibračního mlýna je prakticky vyhovující. Optimálnější variantou se jeví nastavení stroje s parametry Vzorku č. 3.

Tabulka č. 5: Porovnává velikost hmotnostního průtoku s velikostí zrna a dobou dávkování u jednotlivých vzorků.

Vzorek	Hmotnostní průtok [$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$]	Velikost zrna [μm]	Nastavení doby dávkování
Vzorek č. 1	00,02042	21,53	minimální hodnota
Vzorek č. 2	0,0163	22,09	postupný nárůst
Vzorek č. 3	0,07154	19,78	postupný nárůst
Vzorek č. 4	0,07093	26,22	postupný nárůst
Vzorek č. 5	0,05581	21,47	střední hodnota
Vzorek č. 6	0,02388	27,83	postupný nárůst
Vzorek č. 7	0,0144	25,79	postupný nárůst
Vzorek č. 8	0,03335	25,89	postupný nárůst

Vzorek	Hmotnostní průtok [$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$]	Velikost zrna [μm]	Nastavení doby dávkování
Vzorek č. 9	0,01422	28,5	postupný nárůst
Vzorek č. 10	0,05242	28,18	maximální hodnota

Grafické znázornění na obr. 37 srozumitelně zpřehledňuje rozdíly naměřených hodnot hmotnostního průtoku a zrnitosti u jednotlivých vzorků, ukazuje proměnlivý vývoj hmotnostního průtoku.



Obr. 37: Grafické znázornění naměřených hodnot hmotnostního průtoku a zrnitosti jednotlivých vzorků

4.4 Simulace procesu mletí na vibračním mlýně v laboratoři VŠB – TU Ostrava

Mlecí experimenty na vibračním mlýně v laboratoři VŠB – TU Ostrava byly provedeny celkem 7 krát dle metodiky viz kapitola 3.3.

Bylo prokázáno, že právě po 30 minutách mletí materiálu byla surovina rozmělněna na požadované částice (velmi jemné částice), nejmenší velikost zrna byla prokázána po 40 minutách mlecího experimentu.

4.5 Granulometrická analýza vzorků odebraných při simulovaném procesu mletí

Metodika granulometrické analýzy vzorků odebraných při simulovaném procesu mletí probíhala za stejných podmínek jako u granulometrické analýzy vzorků odebraných ve firmě Feromagnet. Závislost doby mletí na velikosti zrna se granulometrickou analýzou s prokázaným proměnlivým vývojem velikosti zrna nepotvrdila.

Charakteristika kumulativních křivek potvrzuje vznik dvouvrcholového grafu o hodnotách $0,2 - 1 \mu\text{m}$ a $20 - 30 \mu\text{m}$ a opět naznačila tvorbu shluků.

Z porovnání výsledků lze odvodit, že vzorky namleté na vibračním mlýnu ve firmě Feromagnet a vzorky ze simulačního laboratorního mletí jsou v podstatě stejné ve velikosti zrna a s největší pravděpodobností tvoří shluky, agregáty.

4.6 Mikroskopie všech odebraných vzorků

Metodika mikroskopování vzorků z firmy Feromagnet a simulačního mletí byla shodná. Před začátkem mikroskopování byly vzorky podrobeny „rozbití“ shluků na menší částice pomocí ultrazvuku, 1g vzorku byl rozmíchán ve skleněné kádince s vodou, umístěn do ultrazvukové vany, kde došlo pomocí ultrazvukového signálu v časovém intervalu 2 minut k poškození shluků ve vzorku. Poté byla kádinka s připraveným vzorkem vyjmuta, kapka vzorku byla přemístěna na čisté podložní sklíčko a následovalo vlastní mikroskopování prováděné experimentátorem. Podložní sklíčko se vzorkem bylo umístěno na stolek mikroskopu. Makrošroubem a mikrošroubem bylo zaostřeno a byl vytvořen snímek. Celý postup byl za stejných podmínek proveden na 14 vzorcích (10 vzorků z firmy Feromagnet a 4 vzorky ze simulovaného procesu mletí).

Optické vyhodnocení snímků mikroskopování jednotlivých vzorků potvrdilo, že částice tvoří velikostně proměnlivé shluky, agregáty.

4.7 Rentgenová prášková difrakce

Analýza rentgenové práškové difrakce stanovila strukturu a složení vzorku dle metodiky viz kapitola 3.6.

Analýza potvrdila, že vzorek měřeného materiálu z firmy Feromagnet je složením stroncium hexaferit $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ neboli feromagnet, a je tedy surovinou běžně používanou pro výrobu feritového magnetu.

5 NÁVRH RECYKLACE VÝROBNÍHO ODPADU

5.1 Návrh optimálního řešení stanoveného problému

Analýza a vyhodnocení procesu mletí a měření naznačily, že mechanické schopnosti vibračního mlýna rozemlít částice do velikosti 1 μm a nepravidelně na velikost 0,8 μm jsou dostačující. Částice však následně tvoří velikostně proměnlivé shluky (20 – 30 μm) a nejnižší velikost zrna byla zjištěna na 19,78 μm . Současně prokázaly, že doba mletí, stanovená na 30 minut je přijatelná. Hodnoty hmotnostního průtoku a velikosti zrna byly u stávajícího nastavení doby dávkování (střední hodnota) přijatelné, avšak ke zefektivnění procesu mletí by bylo vhodné se zamyslet nad využitím podmínek nastavení zjištěných u Vzorku č. 3. V neposlední řadě je třeba zmínit, že zvolený vstupní materiál pro výrobu feritového magnetu je ve firmě Feromagnet přiměřený potřebám výroby.

Ke zefektivnění procesu recyklace by byly naznačeny tři možná řešení problému, která by spočívala v úpravě hmotnostního průtoku, v zamezení tvorbě agregátů a rozbíjení agregátů.

Hmotnostní průtok by mohla pozitivně ovlivnit úprava sklonu zásobníku, úprava průměru otvoru dávkování vstupní suroviny do šnekového dopravníku vibračního mlýna a úprava doby dávkování vstupní suroviny.

Tvorbě shluků by mohlo zamezit vhodné aditivum sypkého charakteru, které bude přidáváno do procesu suchého mletí současně se vstupní surovinou.

Nabízí se také možnost využití ultrazvukové technologie, která by ve fázi mokrého mletí mohla vzniklé agregáty rozbíjet na požadované částice.

5.2 Návrh implementace optimálního řešení do praxe

Některé implementace řešení do praxe se neobejdou bez investic.

První investice bude znamenat instalaci nového zásobníku, který by měl dodržet sklon ostrého sypného úhlu a zvětšení průměru otvoru dávkování. Toto opatření by nemělo zasáhnout do stávajícího uspořádání zařízení a tedy do změny instalace výrobní linky.

Další investicí je prověření a nákup vhodného aditiva sypkého charakteru, které by mohlo prokázat, že proces mokrého mletí by nebyl v tomto případě recyklace potřebný.

Z čehož vyplývá i úspora energie a případně dalších nákladů. Problematika vhodného aditiva se nabízí jako zajímavé téma pro pokračování a rozvíjení například v rámci práce disertační.

Zřejmě nejnákladnější investicí by bylo zavedení ultrazvukové technologie do procesu mokrého mletí, které by znamenalo úpravu výrobního postupu a nákup vhodné ultrazvukové technologie. O této variantě lze optimálně uvažovat v případě, že se ve firmě Feromagnet rozhodnou pro vybudování nové výrobní linky, protože instalace ultrazvuku bude znamenat zásah do ustavení výrobního zařízení.

Proškolení obsluhy vibračního mlýna zaměřené na kontrolu procesu dávkování a ulpívání suroviny na stěnách zásobníkového otvoru se jeví jako řešení bez zásadních investic.

K zefektivnění procesu mletí bude vhodné se zamyslet nad využitím podmínek nastavení zjištěných u Vzorku č. 3.

6 ZÁVĚR

Cílem předkládané práce bylo stanovit optimální podmínky zpracování feritového magnetu ve fázi suchého mletí. Inspirací byla vize možnosti zkvalitnění řízené recyklace vznikajícího odpadu v praxi.

Testování započalo přímo v praxi, na vibračním mlýně ve firmě Feromagnet s.r.o., odebráním vzorků za účelem prověření velikosti namletého zrna při adaptaci doby mletí. Smyslem bylo stanovení optimální doby mletí, sledování zrnitosti do 1 μm , ideálně 0,8 μm .

Granulometrická analýza rozemleté suroviny prokázala, že velikost zrna je v hodnotách 20 – 30 μm proměnlivá. Grafická podoba získaných výsledků naznačila tvorbu agregátů. Vystal předpoklad, že doba mletí je nevhodně seřízená. Korekce doby mletí a proměřené výsledky tuto hypotézu však v zásadě nepotvrdily. Jako optimální doba suchého mletí se projevil termín 30 minut.

Domněnka tvorby agregace částic se potvrdila při optickém mikroskopování vzorků. Agregace částic byla partná jak na vzorcích z praxe vibračního mlýna, tak u vzorků ze simulovaného procesu mletí v laboratorních podmínkách. Mikroskopováním, jehož součástí bylo využití ultrazvuku jako technologie „rozbíjení“ namletých shluků na menší částice, bylo možno sledovat proměnlivost velikosti shluků a kumulaci menších částic k bezprostředně nejbližším agregátům.

Granulometrická měření vzorků současně měla vyhodnotit odhad, zda vibrační mlýn je schopen mechanickým procesem suchého mletí vstupní surovinu rozemlít na velikost zrna do 1 μm . Tento předpoklad byl vyhodnocen jako správný.

Součástí testovacích prací na vibračním mlýně bylo proměření hmotnostního průtoku, jelikož se nabízelo, že stávající nastavení doby dávkování není efektivní. Porovnání hodnot v závislosti na době dávkování suroviny a velikosti namletého zrna prokázalo, že jako optimálnější nastavení vibračního mlýna by mohlo být nastavení s parametry minimální až střední doby dávkování suroviny. Současně prokázalo, že toto navržené nastavení se od stávajících podmínek nastavené doby dávkování suroviny odlišuje jen minimálně.

Ze sledování a průběžného vyhodnocování podmínek mletí vyplynulo, že efektivnost mletí může být negativně ovlivněna nerovnoměrným propadáním množství suroviny do zásobníku a ulpíváním suroviny na stěnách zásobníkového otvoru.

Domněnka, že složení proměřované suroviny určené k výrobě feritového magnetu obsahovalo nevhodné částice, se nepotvrdila. Rentgenová prášková difrakce stanovila, že vzorek měřeného materiálu je surovinou běžně používanou pro výrobu feritového magnetu.

Analýza a vyhodnocení procesu mletí a všech provedených měření prokázaly, že mechanické vlastnosti vibračního mlýna rozemlít částice do velikosti 1 μm jsou dostačující, avšak tyto následně tvoří shluky, agregáty, o velikosti 20 – 40 μm . Současně prokázaly, že doba mletí, stanovená na 30 minut, a stávající technologický postup nepotřebují v zásadě upravovat. V neposlední řadě je vhodné zmínit, že zvolená surovina byla přiměřená potřebám výroby.

K zefektivnění procesu recyklace byla naznačena tři možná řešení, která by spočívala v úpravě hmotnostního průtoku, v zamezení tvorbě agregátů a v zavedení technologie rozbíjení agregátů.

Hmotnostní průtok by mohla pozitivně ovlivnit úprava sklonu stěn zásobníku a zvětšení otvoru dávkování. Dílčím řešením vedoucím ke zlepšení by mohla být i úprava doby dávkování vstupní suroviny do zásobníku.

Tvorbě shluků by mohlo zamezit vhodné aditivum sypkého charakteru, které by bylo přidáno do procesu mletí současně se vstupní surovinou.

Na zefektivnění procesu mletí by se mohlo podílet zavedení ultrazvukové technologie, která by ve fázi mokrého mletí mohla rozbíjet vzniklé agregáty na menší částice.

Na závěr vyvstávají otázky, jak velký smysl by mělo zavedení navržených řešení do praxe, zda jsou navržená opatření reálná. Některá řešení vyžadují další prověřování, většina řešení se neobejde bez investic, které by efektivitu procesu mohly narušit.

Nesporně však práce naznačila směry budoucího výzkumu.

POUŽITÁ LITERATURA

1. Permanentní magnety [online]; Feromagnet,
http://www.feromagnet.cz/images/soubory/Permanentni_magnety.pdf (accessed Nov 11, 2016).
2. Snášelová, L. Optimalizace procesu slinování a tepelného zpracování slitin na bázi Nd-Fe-B pro přípravu permanentních magnetů s vysokou koercivitou. Diplomová práce, VŠB, 2015.
3. Šerý, M. Vlastnosti permanentních magnetů. Diplomová práce, Západočeská univerzita v Plzni, 2013.
4. Magnetické pole. Wikiskripta.
http://www.wikiskripta.eu/index.php/Magnetick%C3%A9_pole (accessed Nov 18, 2016).
5. Types of Permanent Magnets. Magcraft. <http://www.rare-earth-magnets.com/types-of-permanent-magnets> (accessed Nov 18, 2016).
6. Druhy magnetu. Abc magnet. <http://www.abcmagnet.cz/druhy-magnetu.php?druh=ferity> (accessed Nov 18, 2016).
7. Alnico Magnets. Arnoldmagnetics. <http://www.arnoldmagnetics.com/en-us/Products/Alnico-Magnets> (accessed Nov 18, 2016).
8. Alnico Magnets. Magnetsales. <http://www.magnetsales.com/alnico/all.htm#general> (accessed Nov 18, 2016).
9. Neodymium magnets. Supermagnete.
<https://www.supermagnete.de/eng/supermagnete-strong-neodymium-magnets> (accessed Nov 19, 2016).
10. Otázky a odpovědi. Magneticportal.
<http://www.magneticportal.cz/otazky%20a%20odpovedi> (accessed Nov 19, 2016).
11. LH magnet. <http://www.lhmagnet.cz/> (accessed Nov 19, 2016).

12. Technologie výroby. Abcmagnet. <http://www.abcmagnet.cz/technologie-vyroby.php> (accessed Nov 20, 2016).
13. Jírotka, P. Aplikace permanentních magnetů na bázi Nd-Fe-B v automobilovém a transportním průmyslu. Bakalářská práce, VŠB, 2014.
14. How are AlNiCo magnets made. First4magnets. <http://www.first4magnets.com/tech-centre-i61/information-and-articles-i70/alnico-magnet-information-i84/how-are-alnico-magnets-made-i97> (accessed Jan 27, 2017).
15. Magnetické pole. SPŠE Mohelnice. <http://www.spsemoh.cz/vyuka/zae/el7.htm> (accessed Nov 16, 2016).
16. Lacko, R. Testovací pracoviště pro analýzu vlastností permanentních magnetů pro elektrické pohony. Bakalářská práce, Univerzita v Pardubice, 2011.
17. Centrum sypkých hmot VŠB - TU Ostrava. Bulk solids centre. <http://bsc.vsb.cz/> (accessed Feb 23, 2017).
18. Interní materiály centra sypkých hmot VŠB - TU Ostrava
19. Labinex CZ. <http://www.labimex.cz/laboratore/pristrojeprodukty/laserove-granulometry-analyzatory-velikosti-castic> (accessed March 01, 2017).
20. Cilas. http://www.particle-size.com/cilas_1190_particle.htm (accessed March 01, 2017).
21. Cilas. <https://www.cilas.com/en/particle-size-analyzer> (accessed March 01, 2017).
22. Identifikace materiálů pomocí metod rentgenové práškové difrakce. Přírodovědecká fakulty Masarykovy univerzity. http://www.sci.muni.cz/chemsekcce/c8870/pdf/Uloha10_RTG.pdf (accessed March 14, 2017).
23. Laboratoř rentgenové difraktometrie a spektrometrie. VŠCHT Praha. <http://clab.vscht.cz/rtg> (accessed March 14, 2017).

24. Pracoviště RTG difrakce. Hornicko-geologická fakulta VŠB-TU Ostrava.
<http://agent.vsb.cz/category/profily-pracovist/vsb-tuo/hornicko-geologicka-fakulta/institut-cistych-technologii-tezby-a-uziti-energetickych-surovin/pracoviste-rtg-difrakce/> (accessed March 14, 2017).
25. Feromagnet. <http://www.feromagnet.cz/o-nas> (accessed March 15, 2017).
26. Interní materiály firmy Feromagnet, s.r.o.
27. Unimagnet. <https://www.unimagnet.cz/blog/co-je-to-magnet-n3> (accessed March 20, 2017).
28. Fyzika pro život. <http://fyzika.fyzikaprozivot.cz/6-rocnik/4-1-magnety> (accessed March 20, 2017).
29. Arnold magnetic technologies. <http://www.arnoldmagnetics.com/en-us/Permanent-Magnet-Applications-Guide> (accessed March 28, 2017).
30. Electrical4u. <https://www.electrical4u.com/permanent-magnet-dc-motor-or-pmdc-motor/> (accessed March 28, 2017).
31. E - magnets UK. http://e-magnetsuk.com/ferrite_magnets/applications.aspx (accessed March 28, 2017).
32. Materiály magneticky tvrdé a magneticky měkké. Elektross.
http://elektross.gjn.cz/elmotor_magnet/elmagnet1.html (accessed March 28, 2017).

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Tyčový magnet	2
Obr. 2: Magnetizační křivka feromagnetické a paramagnetické látky [15]	5
Obr. 3: Hysterezní křivka feromagnetického materiálu [15]	6
Obr. 4: Ukázka magneticky tvrdého a měkkého materiálu [15]	7
Obr. 5: Schéma výroby feritového magnetu	13
Obr. 6: Schéma výroby magnetů ze vzácných zemin	15
Obr. 7: Schématický náčrt výroby AlNiCo magnetu dle metody sléván	16
Obr. 8: Schématický náčrt výroby AlNiCo magnetu metodou spékání	17
Obr. 9: Vstupní surovina	19
Obr. 10: Analyzátor částic značky CILAS v laboratoři centra sypaných hmot školy VŠB - TU Ostrava [18]	22
Obr. 11: Práce na laserovém analyzátoru velikosti částic CILAS 1190	22
Obr. 12: Kumulativní křivka vzorků mletých ve firmě Feromagnet	24
Obr. 13: Vibrační mlýn výukové laboratoře Institutu environmentálního inženýrství VŠB – TU Ostrava	25
Obr. 14: Vstupní surovina	26
Obr. 15: Stav vstupní suroviny po 5 minutách mletí – naprosto neporušena	27
Obr. 16: Vstupní surovina po 10 minutách mletí – patrné narušení některých kuliček	28
Obr. 17: Feritové kuličky po 20 minutách mletí – nárůst distribuce velmi jemných částic, patrnější porušení	29
Obr. 18: Vstupní surovina namletá na velmi jemné částice	30
Obr. 19: Kumulativní křivka vzorků z procesu simulace mletí	32
Obr. 20: Videokamera s mikroskopem značky CILAS [21]	33
Obr. 21: Vzorek č. 1	34
Obr. 22: Vzorek č. 2	34
Obr. 23: Vzorek č. 3	34
Obr. 24: Vzorek č. 4	34
Obr. 25: Vzorek č. 5	34
Obr. 26: Vzorek č. 6	34
Obr. 27: Vzorek č. 7	35
Obr. 28: Vzorek č. 8	35

Obr. 29: Vzorek č. 9.....	35
Obr. 30: Vzorek č. 10.....	35
Obr. 31: Vzorek č. 1.....	35
Obr. 32: Vzorek č. 2.....	35
Obr. 33: Vzorek č. 3.....	36
Obr. 34: Vzorek č. 4.....	36
Obr. 35: Práškový difraktometr Bruker Advence D8	36
Obr. 36: Difraktogram vstupní suroviny – feromagnetu tzv. stroncia hexaferitru, $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$	37
Obr. 37: Grafické znázornění naměřených hodnot hmotnostního průtoku a zrnitosti jednotlivých vzorků	40

SEZNAM TABULEK

Tabulka č. 1: Popis odebraných vzorků.....	20
Tabulka č. 2: Znázornění hmotnostních průtoků jednotlivých odebraných vzorků	21
Tabulka č. 3: Ukázka proměnlivého vývoje velikosti částic namletého materiálu	23
Tabulka č. 4: Proměnlivý vývoj velikosti částic namletých vzorků	31
Tabulka č. 5: Porovnává velikost hmotnostního průtoku s velikostí zrna a dobou dávkování u jednotlivých vzorků.	39